

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE  
EQUILIBRIO DE HUMEDAD EN EL  
SISTEMA PAPEL-ACEITE DE  
TRANSFORMADORES

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO FIN DE GRADO

AUTOR: VÍCTOR GARIJO RESINO

TUTOR: RAFAEL DAVID VILLARROEL RODRÍGUEZ

MADRID - 2014



*«Después de la electricidad,  
la naturaleza no tiene interés para mí.  
No está lo bastante perfeccionada.»*

Mayakovsky.



# Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional y el estímulo de Rafael Villaroel Rodríguez y Belén García de Burgos. Es mucho el tiempo que han dedicado para que todo saliera bien adaptándose en todo momento a mis necesidades. Ambos son la base de este trabajo y a ellos está especialmente dedicado. También me gustaría agradecer a los técnicos de laboratorio: Javier, Celia y Tamara, que hicieron de la fase experimental toda una experiencia de aprendizaje.

Una mención especial a todos los amigos de verdad que he forjado durante mi época en la Escuela. Cada sufrimiento con ellos se hacía menos doloroso. Agradecer especialmente a David Antón por toda su ayuda en la escritura de este trabajo mediante L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Reconocer también a Miguel, Pedro y Álvaro las correcciones aportadas al texto.

A mis amigos de toda la vida, con los que compartido muchas horas de estudio y desfreno. Alberto, David, Gastón, Gustavo, Santy y Gorka, particularmente a este último con el que he compartido cientos de horas en las mesas de estudio, mucha fuerza para terminar esa ingeniería naval, recuerda que esto no acaba con nadie.

No puedo olvidar a mi familia, en cuyo estímulo constante y apoyo he confiado a lo largo de los cuatro años en la Escuela. Quiero dedicarle este escrito a mi hermano Carlos, que ha seguido todos mis pasos de cerca y siempre ha tendido una mano amiga, esto no hubiera sido posible sin ti, no lo dudes ni un momento. Una mención especial a mi primo Daniel por la ayuda con las figuras y el estilo del texto.

---

Por último, agradecerle a Cristina, mi novia, por soportarme en todos los momentos de flaqueza y brindarme esa sonrisa que convertía cada caída en un remonte y cada fracaso en una victoria.

Si me olvido de alguien, ruego me disculpes, seguramente también hayas aportado algo especial a este ensayo.

Gracias a todos y cada uno de vosotros por haber hecho esto posible.

# Resumen

El transformador de potencia es el elemento clave de cualquier sistema eléctrico moderno. Estas máquinas son las encargadas de reducir y aumentar los niveles de tensión para así disminuir las pérdidas en el transporte. Además, también condicionan la tensión a los niveles adecuados para los puntos de consumo.

La pérdida de un transformador de potencia puede ser determinante para la estabilidad del sistema eléctrico. Por este motivo, es muy importante conocer con cierta seguridad el estado en el que se encuentran todos los transformadores del sistema eléctrico. La mayoría de los problemas de los transformadores derivan de fallos en los sistemas de aislamiento debido al deterioro de estos. Los aislamientos dentro del transformador, tanto el aceite como el aislamiento celulósico, sufren la mayor parte de su desgaste debido a la presencia de partículas de agua en ellos. El agua envejece más rápidamente los aislamientos, reduce la rigidez dieléctrica y disminuye la tensión a la que se inician las descargas parciales en el transformador. Debido a estas razones, se debe conocer con seguridad el contenido de agua en la máquina.

En el presente Trabajo Fin de Grado, se han desarrollado las curvas de equilibrio entre humedad del aceite y humedad en el papel de tres aceites ampliamente utilizados con el fin de conocer mejor el comportamiento de los ésteres comerciales ante la presencia de agua. Para trazar las curvas de equilibrio se hallarán primero mediante dos métodos experimentales distintos las curvas de equilibrio del sistema aire-aceite. Unificando las curvas obtenidas experimentalmente con las curvas de equilibrio del sistema aire-papel propuestas por Oommen se obtendrán las curvas equilibrio del sistema papel-aceite para los tres aceites.

Palabras clave: Transformador, aceite de transformador, curvas de solubilidad, curvas de equilibrio en sistemas de papel-aceite .

---





# Abstract

Power transformers are key elements of any modern electric system. These electric machines decrease and increase voltage levels in order to reduce losses of the power lines. Furthermore, transformers are in charge of setting up the voltage for consumption points.

The loss of a power transformer can be decisive in the stability of the electric system. Because of this, it is really important to know certainly which the current state of all the power transformers is in the electric system. Most of the problems within transformers are related to oil and cellulosic insulations, as they suffer most of its degradation due to the presence of water in them. Water ages faster the machine, reduces the dielectric strength and makes the voltage difference, for the start of partial discharges, smaller. For these reasons, the water content of the transformers has to be deeply known in order to avoid any electric failure.

In this Bachelor Thesis, the equilibrium curves for humidity in the oil and for humidity in the cellulosic have been carried out for three well known commercial oils. This experiment aims for a better understanding in the behavior of commercial esters in the presence of water. In order to draw the equilibrium curves, equilibrium curves for the air-oil system will be found with two different experimental methods. Unifying these curves with Oommen's equilibrium curves for air-paper systems, equilibrium curves for the oil-paper system for the three oils will be found.

Keywords: Transformer, transformer oil, solubility curves, equilibrium curves for oil-paper systems.

---



# Lista de Contenidos

<b>Lista de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de ecuaciones</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de símbolos y variables</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Humedad en el aceite del transformador . . . . .	3
1.2 Planteamiento del estudio del problema . . . . .	4
1.3 Objetivos del documento . . . . .	4
1.4 Estructura del documento . . . . .	5
<b>2 Dinámica de la humedad en los transformadores</b>	<b>7</b>
2.1 Aislamientos y componentes en el interior del transformador . . . . .	7
2.1.1 Aislamientos finos en zonas calientes. Papel Kraft . . . . .	8
2.1.2 Aislamientos finos en zonas frías. Cartón o <i>Pressboard</i> . . . . .	8
2.1.3 Aislamientos gruesos . . . . .	8
2.1.4 Aceite de transformador . . . . .	9
2.2 Principales fuentes de la humedad en los transformadores . . . . .	11
2.2.1 Descomposición de los materiales aislantes . . . . .	11
2.2.2 Humedad residual . . . . .	12
2.2.3 Ingreso desde la atmósfera durante la instalación del transformador . . .	12
2.2.4 Ingreso desde la atmósfera durante el funcionamiento en carga . . . . .	13
2.3 Humedad relativa y saturación relativa . . . . .	13
2.3.1 Humedad relativa . . . . .	14
2.3.2 Saturación relativa . . . . .	14

---

2.4	Dinámica de humidificación . . . . .	16
2.5	Distribución de la humedad en los transformadores . . . . .	17
2.5.1	Distribución de la humedad según grosor del aislante . . . . .	17
2.5.1.A	Aislantes finos en zonas calientes . . . . .	17
2.5.1.B	Aislantes finos en zonas frías . . . . .	17
2.5.1.C	Aislantes gruesos . . . . .	17
2.5.1.D	Aceite de transformador . . . . .	18
2.6	Riesgos eléctricos derivados de un alto contenido de agua en el transformador .	18
2.7	Principales características de los tres aceites usados durante los experimentos .	19
<b>3</b>	<b>Curvas de solubilidad de los aceites y curvas de equilibrio del sistema papel-aceite</b>	<b>21</b>
3.1	Curvas de solubilidad del aceite . . . . .	22
3.1.1	Métodos para calcular la solubilidad del agua en el aceite de transformador	23
3.1.1.A	Análisis de la solubilidad siguiendo el estándar ASTM D1533 .	23
3.1.1.B	Análisis de la solubilidad siguiendo el estándar ASTM D4056-92	24
3.1.1.C	Análisis de la solubilidad según el método propuesto por Du .	24
3.1.1.D	Análisis de la solubilidad mediante el método de mínimos cua- drados . . . . .	25
3.2	Curvas de equilibrio en el sistema papel-aceite . . . . .	25
3.2.1	Contexto teórico sobre las curvas de equilibrio de humedad en sistemas de papel-aceite . . . . .	26
3.2.2	Distintas curvas de equilibrio para presiones parciales de vapor de agua y contenido de humedad en el papel de transformador . . . . .	27
3.2.2.A	Curvas de equilibrio de Piper. 1946 . . . . .	27
3.2.2.B	Curvas de equilibrio de Fessler. 1987 . . . . .	27
3.2.2.C	Curvas de equilibrio de M. Scala. 2004 . . . . .	28
3.2.3	Distintas curvas de equilibrio para contenido de humedad en el papel y en el aceite frente a humedad relativa del sistema . . . . .	29
3.2.3.A	Curvas de equilibrio de Fabre y Pichon o curvas de Norris. 1960	29
3.2.3.B	Curvas de equilibrio de Oommen. 1983 . . . . .	29
3.2.3.C	Curvas de equilibrio de Griffin. 1988 . . . . .	30

3.2.3.D	Curvas de equilibrio del ITM (Instituto Tecnológico de Massachusetts). 1999 . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Metodología experimental</b>	<b>31</b>
4.1	Determinación de la concentración de humedad en líquidos aislantes por valoración coulométrica automática de Karl Fischer . . . . .	32
4.2	Equipos usados a lo largo de los experimentos . . . . .	33
4.2.1	Valorador coulométrico de Karl Fischer . . . . .	33
4.2.2	Cámara climática . . . . .	34
4.3	Metodología aplicada a la toma de muestras en los laboratorios . . . . .	34
4.4	Primer método experimental . . . . .	35
4.5	Segundo método experimental . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Determinación de las curvas de solubilidad de los aceites</b>	<b>37</b>
5.1	Metodología para la determinación de las curvas de solubilidad del aceite . . .	38
5.2	Determinación de las curvas de solubilidad de los aceites mediante el primer método experimental . . . . .	38
5.2.1	Curva de solubilidad de BIOELECTRA™ . . . . .	39
5.2.2	Curva de solubilidad de BIOTEMP™ . . . . .	40
5.2.3	Curva de solubilidad de Nytro Taurus™ . . . . .	41
5.3	Determinación de las curvas de solubilidad de los aceites mediante el segundo método experimental . . . . .	42
5.3.1	Curva de solubilidad de BIOELECTRA™ . . . . .	42
5.3.2	Curva de solubilidad de BIOTEMP™ . . . . .	43
5.3.3	Curva de solubilidad de Nytro Taurus™ . . . . .	44
5.4	Comparación y discusión de los resultados obtenidos . . . . .	45
5.4.1	Comparación de los resultados obtenidos para BIOELECTRA™ . . . .	46
5.4.2	Comparación de los resultados obtenidos para BIOTEMP™ . . . . .	47
5.4.3	Comparación de los resultados obtenidos para Nytro Taurus™ . . . .	48
5.4.4	Comparación de las curvas de solubilidad entre los diferentes aceites y entre los diferentes métodos con las curvas teóricas de solubilidad . . . .	49
<b>6</b>	<b>Determinación de las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite</b>	<b>51</b>

6.1	Metodología para la determinación de las curvas de equilibrio del sistema papel- aceite de transformador . . . . .	51
6.2	Valores en el equilibrio para el sistema papel-aire según Oommen . . . . .	52
6.3	Curva de equilibrio del sistema papel-aceite para BIOELECTRA <sup>TM</sup> . . . . .	53
6.4	Curva de equilibrio del sistema papel-aceite para BIOTEMP <sup>TM</sup> . . . . .	54
6.5	Curva de equilibrio del sistema papel-aceite para Nytro Taurus <sup>TM</sup> . . . . .	55
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>61</b>

# Lista de Figuras

2.1	Sección transversal de un transformador de 400 kV en el lado de 220 kV. Tomado de [6] e interpretado . . . . .	9
2.2	Distribución del campo eléctrico en el conjunto papel-aceite ante campo tangencial . . . . .	10
2.3	Incremento del contenido de agua en función de la rotura de cadenas moleculares según distintos autores. Tomado de [5] . . . . .	11
2.4	Flujo que sigue la humedad según la variación de temperatura en el transformador. Izquierda: Calentamiento. Derecha: Enfriamiento . . . . .	16
2.5	Tensión de ruptura según las partículas en el aceite y según la humedad relativa de éste. Extraído de [5] . . . . .	19
3.1	Curva de solubilidad de un aceite mineral. Tomada de [19] . . . . .	22
3.2	Curvas de equilibrio en el sistema papel-aceite de Oommen. Tomada de [19] . .	26
4.1	Recipiente de valoración . . . . .	33
4.2	Analizador de contenido de agua en el aceite de transformador . . . . .	33
4.3	Cámara climática usada para los experimentos . . . . .	34
5.1	Curva de solubilidad experimental de BIOELECTRA <sup>TM</sup> . . . . .	39
5.2	Curva de solubilidad experimental de BIOTEMP <sup>TM</sup> . . . . .	40
5.3	Curva de solubilidad experimental de Nytro Taurus <sup>TM</sup> . . . . .	41
5.4	Curva de solubilidad experimental de BIOELECTRA <sup>TM</sup> . . . . .	43
5.5	Curva de solubilidad experimental de BIOTEMP <sup>TM</sup> . . . . .	44
5.6	Curva de solubilidad experimental de Nytro Taurus <sup>TM</sup> . . . . .	45
5.7	Comparación entre las curvas de solubilidad de BIOELECTRA <sup>TM</sup> obtenidas mediante ambos métodos y la curva teórica de solubilidad . . . . .	46
5.8	Comparación entre las curvas de solubilidad de BIOTEMP <sup>TM</sup> obtenidas mediante ambos métodos y la curva teórica de solubilidad . . . . .	47

5.9	Comparación entre las curvas de solubilidad de Nytro Taurus <sup>TM</sup> obtenidas mediante ambos métodos y la curva teórica de solubilidad . . . . .	48
5.10	Comparación entre las curvas de solubilidad de los diferentes aceites por cada método con las curvas teóricas . . . . .	49
6.1	Curva de equilibrio en el sistema papel-aceite con aceite BIOELECTRA <sup>TM</sup> . .	53
6.2	Curva de equilibrio en el sistema papel-aceite con aceite BIOTEMP <sup>TM</sup> . . . .	54
6.3	Curva de equilibrio en el sistema papel-aceite con aceite Nytro Taurus <sup>TM</sup> . . .	55



# Lista de Tablas

2.1	Características principales de los tres aceites usados durante las fases experimentales. Datos tomados de: [13] [14] [15] [16] . . . . .	19
5.1	Contenido de agua en el aceite según temperatura BIOELECTRA <sup>TM</sup> . . . . .	39
5.2	Valores aproximados mediante MATLAB de la Ecuación de Arrhenius para BIOELECTRA <sup>TM</sup> . . . . .	39
5.3	Contenido de agua en el aceite según temperatura BIOTEMP <sup>TM</sup> . . . . .	40
5.4	Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para BIOTEMP <sup>TM</sup> . . . . .	40
5.5	Contenido de agua en el aceite según temperatura Nytro Taurus <sup>TM</sup> . . . . .	41
5.6	Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para Nytro Taurus <sup>TM</sup> . . . . .	42
5.7	Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para BIOELECTRA <sup>TM</sup> . . . . .	42
5.8	Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para BIOELECTRA <sup>TM</sup> . . . . .	43
5.9	Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para BIOTEMP <sup>TM</sup> . . . . .	43
5.10	Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para BIOTEMP <sup>TM</sup> . . . . .	44
5.11	Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para Nytro Taurus <sup>TM</sup> . . . . .	44
5.12	Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para Nytro Taurus <sup>TM</sup> . . . . .	45
5.13	Contenido de agua en el aceite según temperatura y método, coeficientes A y B experimentales y teóricos de la ecuación de Arrhenius para BIOELECTRA <sup>TM</sup>	46

5.14	Contenido de agua en el aceite según temperatura y método, coeficientes A y B experimentales y teóricos de la ecuación de Arrhenius para BIOTEMP <sup>TM</sup> . .	47
5.15	Contenido de agua en el aceite según temperatura y método, coeficientes A y B experimentales y teóricos de la ecuación de Arrhenius para Nytro Taurus <sup>TM</sup>	48
6.1	Valores en equilibrio para el sistema papel-aire según Oommen . . . . .	52
6.2	Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para BIOELECTRA <sup>TM</sup> . . . . .	53
6.3	Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para BIOTEMP <sup>TM</sup> . . . . .	54
6.4	Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para Nytro Taurus <sup>TM</sup> . . . . .	55

## Lista de Ecuaciones

2.1	Humedad relativa . . . . .	14
2.2	Saturación relativa de humedad aplicada a líquidos y gases ideales . . . . .	14
2.3	Saturación relativa de humedad aplicada a sólidos . . . . .	15
2.4	Saturación relativa de humedad . . . . .	15
3.1	Ley de Arrhenius . . . . .	22
3.2	Curva de solubilidad variante con el envejecimiento según Mladenov . . . . .	23
3.3	Ecuación de relación entre humedad relativa, contenido de agua y solubilidad .	24
3.4	Ecuación de la concentración de agua en equilibrio en el papel según Piper . .	27
3.5	Ecuación de la concentración de agua en equilibrio en el papel según Fessler . .	28
3.6	Ecuación de la concentración de agua en equilibrio en el papel según Scala . .	28
3.7	Valor de la saturación de agua en el papel (% en peso del papel secado) según Scala . . . . .	28

---



## Lista de símbolos y variables

Símbolo	Significado
A, B	Constantes del aceite obtenidas experimentalmente
$A_n$	Número de acidez
$A_r$	Contenido total de compuestos aromáticos
C, D	Constantes del aceite obtenidas experimentalmente
$C_e$	Contenido de agua en equilibrio en el aislamiento
HR	Humedad Relativa
SR	Saturación Relativa
T	Temperatura en grados Kelvin
$W_c$	Contenido de agua en el aislamiento celulósico
$W_{oil}$	Contenido de agua en el aceite
$W_{s-c}$	Valor de saturación del agua en el aislamiento celulósico
$W_{s-oil}$	Valor de saturación del agua en el aceite
$\rho$	Presión parcial ejercida por el vapor de agua
$\rho_s$	Presión parcial ejercida por el vapor de agua saturado



## Capítulo 1

# Introducción

La mayoría de los transformadores alrededor del mundo contienen como elemento aislante principal el aceite. Este éster tiene dos funciones principales: primero, efectuar una transferencia efectiva del calor generado por los arrollamientos evitando así el sobrecalentamiento en el aparato; segundo, una función esencial como aislante eléctrico. Los transformadores pueden ser llenados con cuatro tipos de ésteres distintos: mineral, vegetal, sintético y silicona.

Desde 1880, junto con el desarrollo del sistema eléctrico a gran escala, el aceite mineral se convirtió en el predominante en los equipos eléctricos [1]. El éster mineral ha sido usado principalmente por su buena conductividad térmica, sus cualidades dieléctricas y por encima de todo, su bajo coste.

Las siliconas comenzaron a usarse en 1970 como sustituto del aceite mineral para situaciones en las que el riesgo de incendio del transformador no podía cuestionarse. Se trata de un aislante muy estable y es usado principalmente en transformadores de tracción y en transformadores de pequeño tamaño donde es de esperar un calentamiento excesivo del núcleo. El mayor problema de este tipo de aislante es que, debido a su bajo nivel de biodegradabilidad, su uso está actualmente bastante restringido. Pocos años después, en 1976, comenzaron a desarrollarse los ésteres sintéticos. Estos son usados principalmente en transformadores de distribución donde, al igual que en el caso anterior, la seguridad ante el fuego tiene una prioridad alta.

A partir de la década de los noventa, unido al movimiento de conciencia social por el medio ambiente, se empezaron a desarrollar aceites de base vegetal. Estos aceites son bio-

---

degradables al 95 % -100 % [2][3], tienen una baja toxicidad, mayor punto de inicio de fuego y comparten las mismas cualidades térmicas y aislantes que el éster mineral. Durante 1993, veinticuatro aceites de base alimenticia fueron evaluados. A raíz de los resultados de los aceites a distintas temperaturas y de su resistencia a la oxidación fueron seleccionándose los más apropiados para su uso como líquido dieléctrico. En 1994, se seleccionaron los aditivos más adecuados para mejorar las propiedades eléctricas y térmicas de los aceites, sin verse reducidas su rápida biodegradación y su baja toxicidad [4].

Está reconocido que la humedad en el aceite del transformador es uno de los agentes más dañinos para éste [5][6]. La presencia de partículas de agua en el aceite deteriora tanto la resistencia eléctrica como la resistencia mecánica del éster. Por este motivo la presencia de agua en el aceite es un medidor claro del envejecimiento del transformador.

Al ser de vital importancia conocer en todo momento la humedad contenida en el aceite y cómo ésta envejece al propio aceite y al papel aislante. A lo largo de este texto, se estudiarán las distintas curvas de solubilidad de tres aceites comerciales. Dos de ellos son conocidos como BIOTEMP<sup>TM</sup> del fabricante ABB® y BIOELECTRA<sup>TM</sup> del fabricante REPSOL®, ambos de base vegetal; el tercero, sin embargo, es de base mineral y tiene de nombre comercial Nytro Taurus<sup>TM</sup> del fabricante NYNAS®. A partir de las curvas de solubilidad obtenidas mediante dos tipos de ensayos experimentales se determinarán las curvas de equilibrio en el sistema papel-aceite para así intentar conocer mejor el comportamiento de estos tres aceites comerciales. Además, se presentarán las diferencias que se dan entre las curvas de solubilidad y equilibrio entre aceites minerales y ésteres naturales.



## 1.1. Humedad en el aceite del transformador

La humedad en el aceite del transformador es uno de los problemas más importantes –si no el más importante– del equipo básico de las redes eléctricas modernas. La humedad del éster proviene de tres fuentes bien diferenciadas: el envejecimiento del transformador a través de sus dos fuentes principales de aislamiento, el papel y el aceite; el ingreso desde la atmósfera a través de la respiración del transformador durante su uso en carga y durante su instalación; y, finalmente, la última fuente de contaminación es la humedad residual, aquella que es imposible eliminar durante los procesos de manufactura y secado del transformador. Esta humedad se encuentra alojada en los aislamientos celulósicos gruesos y en las piezas de sujeción. Éstas, al tener mayor densidad, presentan tiempos de difusión de la humedad más altos que el resto de los elementos del transformador por lo que al aplicar el secado al conjunto del transformador no se secan por completo.

Los tres aceites estudiados tendrán una tendencia a atraer agua distinta entre ellos. Al tener diferente composición química, el aceite mineral absorberá mucha menos humedad que los aceites vegetales. Esto se debe a que el agua es una partícula muy polar y ésta tiende a ser fuertemente atraída por otras moléculas polares. El aceite mineral, por su composición química, es muy poco polar mientras que la silicona es un poco más polar. Los aceites naturales o vegetales son, en comparación, enormemente polares. Este comportamiento ocurre porque los aceites naturales presentan cuatro enlaces posibles para moléculas de agua mientras que los aceites minerales no presentan ninguno. Esto explica la alta solubilidad de agua en los aceites con base vegetal [1].

El problema de la humedad en el aceite del transformador se hace más grave según aumenta la saturación relativa del aceite. Este fenómeno también incrementa la conductividad de las partículas que adsorben agua viéndose así reducida enormemente la resistencia dieléctrica del aceite. El fallo dieléctrico del equipo es casi seguro, siempre y cuando no se le ponga solución antes de llegar a un punto de saturación relativa de entre el 70 y el 80 % [5].

## 1.2. Planteamiento del estudio del problema

Conocer de antemano cómo envejecerá el transformador es una tarea de vital importancia. La determinación de las curvas de solubilidad del aceite es uno de los métodos más importantes ya que relaciona la temperatura del aceite con la cantidad de humedad que contiene el éster, que tal y como se aclaró en el epígrafe anterior, está relacionado directamente con la probabilidad de fallo dieléctrico del equipo.

Dentro del proceso de envejecimiento del transformador, también es muy importante el deterioro del papel del transformador. Una vez puesto en funcionamiento el equipo es casi imposible obtener muestras del grado de envejecimiento del papel aislante. Para comprobar la cantidad de agua absorbida por la celulosa es necesario obtener las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite del transformador [5].

## 1.3. Objetivos del documento

El objetivo principal del documento es determinar las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite de un transformador aislado con tres aceites usados en el sector. Para lograr este objetivo primero se obtendrán, experimentalmente, las ecuaciones de solubilidad de los tres aceites mediante la ecuación de Arrhenius y, con las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite propuestas por Oommen, se dibujarán las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite. Para determinar la ecuación de solubilidad de los aceites se realizarán dos tipos de ensayos distintos en el laboratorio con el fin de contrastar resultados. Además, se compararán los resultados obtenidos mediante los experimentos de solubilidad con los datos de los fabricantes.

A la par que se cumplen estos objetivos se cotejarán los resultados de los dos aceites vegetales con el aceite mineral para así poder comparar entre ésteres vegetales y aceites minerales.

## 1.4. Estructura del documento

El presente Trabajo Fin de Grado está constituido de 7 capítulos.

En el primer capítulo, se hace una descripción general del texto, presentando una breve historia de los aceites, los problemas que conlleva la humedad en el aceite de transformador y los objetivos que se pretenden llevar a cabo.

El segundo capítulo presentará de forma teórica los aislamientos con los que suele estar equipado un transformador, se describirán las fuentes de humedad del transformador y se definirán los conceptos de humedad relativa y saturación relativa. Mediante estos conceptos, se presenta la dinámica de humedad presente en el transformador, la distribución de ésta en la máquina y los problemas que produce un exceso de agua en los aislamientos. Al final del capítulo se muestra una tabla resumen con las características más importantes de los tres aceites de transformador usados en la fase experimental.

En el capítulo tercero, se desarrollará toda la información relativa a las curvas de solubilidad de aceites de transformador y a las curvas de equilibrio de sistemas papel-aceite. Además, se presentarán los modelos más usados en la literatura para la obtención de las curvas de solubilidad y para las curvas de equilibrio.

El cuarto capítulo, desarrollará los dos procedimientos experimentales llevados a cabo para determinar las curvas de solubilidad de los tres aceites y se compararán entre ellos. Por otra parte, se encontrará información sobre todos los equipos usados en la fase experimental.

En el capítulo quinto, se ajustarán los puntos hallados experimentalmente a curvas de solubilidad, que se rigen por la ley de Arrhenius, mediante el software MATLAB®. Se estudiarán los resultados obtenidos y se compararán con los valores hallados por los otros métodos usados y con los valores dados por el fabricante y otros autores. Por último, se presentarán las curvas de solubilidad de los tres tipos de aceite, se contrastarán entre ellas y se verificará si los resultados obtenidos son los correctos.

A lo largo del capítulo sexto, se obtendrán las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite para los tres tipos de aceite y se discutirán los resultados.

Por último, el capítulo séptimo, presentará las conclusiones del trabajo y las aportaciones que éste hace al estado del arte.

## Capítulo 2

# Dinámica de la humedad en los transformadores

En este capítulo se presentará toda la información relativa a la dinámica de humedad de los aislamiento del transformador. La sección comenzará definiendo los tipos de aislantes que se encuentran en el transformador, tanto líquidos como sólidos, y además, se mostrarán las distintas fuentes de humedad que afectan a los transformadores en carga. Por otro lado, se explicarán los conceptos básicos de humedad relativa y saturación relativa, introduciéndose así también el proceso de absorción-desorción que sufren los aislantes celulósicos ante la presencia de variaciones químicas, de temperatura o de presión en el transformador. Adicionalmente, se explicará cómo se distribuye la humedad entre los distintos aislantes sólidos y líquido. Tras la exposición de todo el estado del arte relativo a la humedad, se tratarán los riesgos eléctricos que sufre el transformador debido al agua que contiene.

El capítulo finalizará con la presentación de todos los datos de los aceites usados en los experimentos durante el presente Trabajo Fin de Grado.

### 2.1. Aislamientos y componentes en el interior del transformador

Los aislamientos de un transformador tienen como objetivo aislar eléctricamente distintas partes del transformador que se encuentran a diferentes potenciales eléctricos. El correcto

---

diseño de los aislamientos de un transformador ha de tener en cuenta los esfuerzos eléctricos a los que será sometido la máquina para así determinar, de una manera correcta, el tipo de aislante y las cantidades necesarias de éste para el funcionamiento seguro del transformador.

Por lo general, en un transformador se encuentran dos tipos de aislantes. Estos dos, el aislante líquido y el sólido, se encuentran en contacto permanente. El aceite es, por defecto, el material que más esfuerzo dieléctrico resiste puesto que soporta mayor campo eléctrico al ser su permitividad dieléctrica relativa menor que la permitividad dieléctrica de los aislantes celulósicos [7]. La combinación entre los aislantes sólidos y el líquido dotan de una resistencia al campo eléctrico dentro del transformador muy alta que evita descargas eléctricas cuando éste aumenta frente a un impulso tipo rayo o una sobrecarga.

#### **2.1.1. Aislamientos finos en zonas calientes. Papel Kraft**

Se trata de aislantes que funcionan a una temperatura cercana a la de los conductores del transformador. Básicamente, es el papel encargado de proteger los arrollamientos. Suele realizarse mediante papel Kraft ya que es un material poco denso y muy resistente a la corrosión [7]. Su masa total es aproximadamente el 20 % de la masa de aislante sólido total [5].

#### **2.1.2. Aislamientos finos en zonas frías. Cartón o *Pressboard***

Son aquellos que se encuentran a la temperatura externa de los arrollamientos en pleno contacto con el aceite. Se encargan de garantizar el aislamiento entre los arrollamientos y el núcleo. Dentro de este grupo, encontramos los cartones prensados que además de funcionar como barrera ante la propagación del arco eléctrico y de las descargas parciales, aumentan considerablemente la resistencia al campo eléctrico. Su densidad es superior al papel Kraft pero sigue siendo reducida. Presentan entre el 20 y el 30 % del peso total del aislamiento sólido [5].

#### **2.1.3. Aislamientos gruesos**

Estos aislantes, en su mayoría cerámicos y de madera, se encargan de dotar al interior de la cuba del transformador de una estructura sólida. Normalmente, la temperatura a la que están sometidos es la más baja en comparación con los otros aislantes sólidos. Tienen una

densidad alta y representan el 50 % de la masa total del aislante sólido [5]. A continuación, se presenta una imagen de una sección transversal de un transformador mostrando todos sus aislantes sólidos:

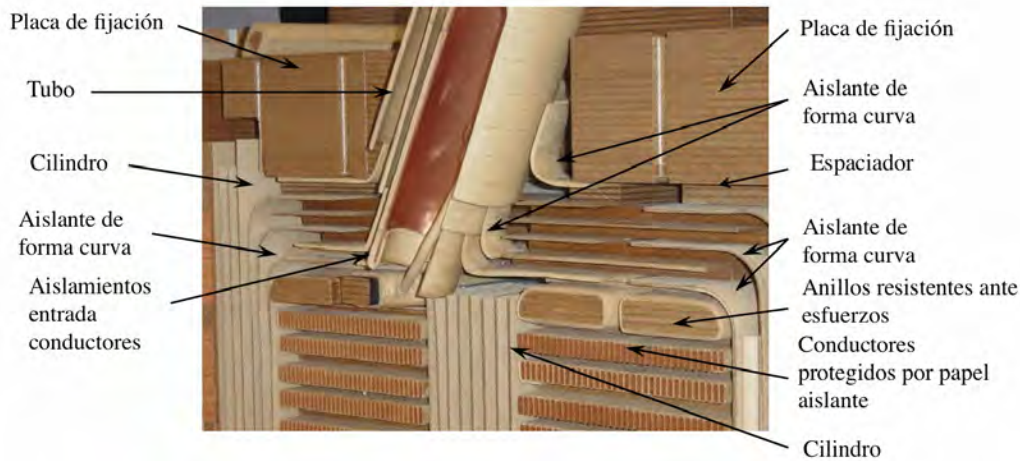


Figura 2.1: Sección transversal de un transformador de 400 kV en el lado de 220 kV.

Tomado de [6] e interpretado

Como se observa, la mayoría de las terminaciones del papel o del cartón aislantes son curvas. De esta manera se consigue que las láminas de papel sean perpendiculares a los campos eléctricos dentro del transformador, esto es, que la laminación sea paralela a las líneas equipotenciales, lográndose así aumentar la rigidez dieléctrica. En la imagen se pueden distinguir los diferentes espacios que hay entre los distintos tramos de aislantes. Estos espacios son distintos según el campo eléctrico al que se verán sometidos, puesto que cuanto mayor es el campo, menor espacio ha de haber entre aislantes.

#### 2.1.4. Aceite de transformador

La mayoría de los transformadores complementan su aislamiento con un líquido aislante. Este líquido tiene dos funciones principales: aislar eléctricamente y actuar como líquido de refrigeración. Hay cuatro tipos de aislantes líquidos, siendo el predominante en la actualidad, con enorme diferencia, el aceite mineral motivado por su bajo coste. A pesar de esto, los aceites de base vegetal están comenzando a usarse ampliamente por ser respetuosos con el medio ambiente [1].

El aceite será el material que más campo eléctrico soporte dentro del transformador ya que su permitividad relativa es inferior a la del papel aislante impregnado. Por este motivo, los puntos más débiles dentro de un transformador son los canales de aceite. Para afrontar este tipo de debilidades se intercalan capas de cartón o de papel impregnado en grandes espacios de aceite. Al penetrar el aceite por los poros de los aislantes sólidos aumenta la rigidez dieléctrica gradualmente en la interfase papel-aceite, formándose un conjunto aislante excepcional, tal y como se ve en la siguiente figura:

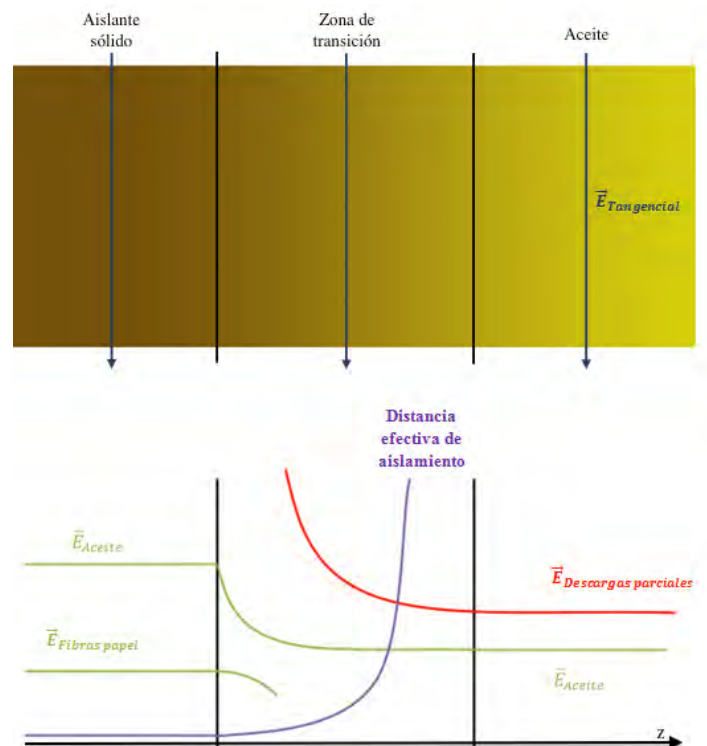


Figura 2.2: Distribución del campo eléctrico en el conjunto papel-aceite ante campo tangencial



## 2.2. Principales fuentes de la humedad en los transformadores

La humedad de un transformador debe estar contenida entre unos límites muy rígidos para preservar así la vida de la máquina. Para que la cantidad de agua del transformador sea la mínima posible, éste es sometido a un proceso de secado antes de salir de fábrica alcanzando unos valores de humedad entre el 0.5 y el 1 % en los aislantes celulósicos [5]. Una vez puesto en funcionamiento la máquina, no se volverán a registrar valores tan bajos de humedad en el transformador, y ésta aumentará progresivamente.

Principalmente se dan tres procesos por los que incrementa la humedad mientras el transformador se encuentra en carga: descomposición de los materiales aislantes; humedad residual; e ingreso desde la atmósfera durante el funcionamiento.

### 2.2.1. Descomposición de los materiales aislantes

El proceso de envejecimiento del transformador y, por tanto, de los aislantes de éste, conlleva la escisión de las cadenas moleculares de los aislantes celulósicos y del aceite. Como consecuencia de esta rotura de las cadenas moleculares, se generan subproductos como agua y compuestos de carácter furánico [8].

Hay diversidad de opinión en la literatura sobre la cantidad de agua que se origina debido a la degradación de los aislantes, tal y como se ve en la siguiente figura:

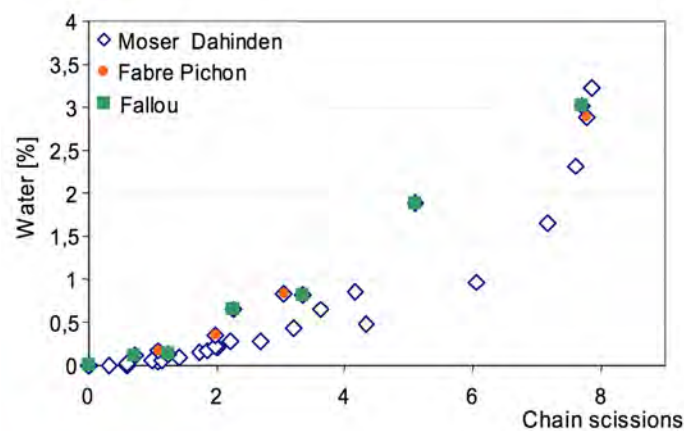


Figura 2.3: Incremento del contenido de agua en función de la rotura de cadenas moleculares según distintos autores. Tomado de [5]

Los mecanismos de degradación que afectan al aislante sólido no son los mismos que los procesos de degradación del aceite. Según Sokolov [9], la oxidación, la pirólisis y la hidrólisis son los mecanismos principales que afectan a los aislantes sólidos. Los procesos rompen los enlaces entre unidades de glucosa de la celulosa haciendo que la resistencia del polímero disminuya, y por tanto, la del papel. Se reducen así la longitud de las cadenas moleculares, liberándose átomos de oxígeno e hidrógeno que darán como subproducto agua. La degradación principal de los aislantes celulósicos se da en los puntos calientes y que comprenden solamente un cinco por ciento del total del aislante total de la máquina. Por otro lado, la oxidación es prácticamente el único proceso de degradación en el aceite.

La variación del contenido de agua debido al transformador afecta enormemente al equilibrio del sistema papel-aceite. Mladenov, aproximó en 2009 el efecto que tiene el envejecimiento de los aislantes en el transformador a una fórmula matemática [10].

### **2.2.2. Humedad residual**

Es la humedad que contienen los distintos aislantes del transformador o que han adquirido durante el proceso de manufactura y que no es eliminada durante el secado de la máquina. La mayoría de la humedad residual se encuentra en los aislantes de base plástica y en los aislantes basados en madera. La explicación es sencilla: estos tipos de materiales necesitan un mayor tiempo de secado en comparación con el secado del papel y del *pressboard* al ser su densidad mayor [5]. El efecto de la humedad residual es patente cuando el transformador lleva cierto tiempo en funcionamiento, ya que con las altas temperaturas de funcionamiento la humedad empieza a migrar hacia otras partes del transformador detectándose un aumento del factor de potencia de la máquina.

### **2.2.3. Ingreso desde la atmósfera durante la instalación del transformador**

Durante el llenado del transformador y su puesta en marcha es imposible evitar que la humedad contenida en el aire pase a la cuba del transformador al verse éste expuesto a la atmósfera.

#### 2.2.4. Ingreso desde la atmósfera durante el funcionamiento en carga

Existen cuatro tipos distintos de ingresos humedad en el transformador cuando éste se encuentra en funcionamiento normal:

- Ingreso de humedad a la máquina mediante pequeños poros en la cuba debido al flujo molecular (Knudsen) producido por una diferencia de presión entre el exterior del transformador y el interior de la cuba.
- Inclusión de humedad en los aislamientos del transformador durante las reparaciones de la máquina. Durante los procesos de reparación en los que parte del aceite (o en su totalidad) es extraído del transformador, entra vapor de agua en la cuba del transformador aumentando así la humedad total contenida en éste.
- Entrada de humedad en la cuba del transformador debido a la pérdida de estanqueidad de éste. Al ser la presión del interior del transformador más baja que en el exterior, se crea un flujo de aire húmedo hacia el interior que humecta los aisladores.
- Ingreso de la humedad a través del depósito de expansión del transformador. Este mecanismo es predominante en los transformadores de respiración libre. Cuando el transformador *respira*, entra aire humectado desde el exterior hacia el interior de la máquina que el gel de sílice no puede secar por completo, ingresando así parte de la humedad del aire en la cuba.

### 2.3. Humedad relativa y saturación relativa

En todo momento debe darse un equilibrio de carácter termodinámico entre papel y aceite. Para que se produzca este equilibrio, también debe existir un balance entre presiones parciales de vapor de agua y de concentraciones relativas entre el aislante líquido y el aislante celulósico [5] [11] [12]. El equilibrio entre la frontera papel-aceite se da cuando las saturaciones relativas se igualan aunque para ello no es necesario que las concentraciones de agua en ambos medios sean iguales.

### 2.3.1. Humedad relativa

La humedad relativa se define como la relación que existe entre la presión parcial ejercida por el vapor de agua en una mezcla gaseosa entre éste y el aire y la presión ejercida por el vapor de agua saturado y el aire a cierta temperatura y presión en el equilibrio [5]. Se calcula de la siguiente manera:

$$HR = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2.1)$$

donde:

HR: Humedad relativa.

$\rho$ : Presión parcial ejercida por el vapor de agua sobre el aire.

$\rho_s$ : Presión parcial ejercida por el vapor de agua saturado sobre el aire.

La humedad relativa sólo se refiere a gases mientras que para sólidos y líquidos se aplica la saturación relativa.

### 2.3.2. Saturación relativa

Siempre debe darse un equilibrio de carácter termodinámico entre papel y aceite. Para que se produzca este equilibrio también debe existir un balance entre las concentraciones relativas de humedad en el aislante líquido y en el aislante celulósico [11].

En líquidos y gases de comportamiento ideal, la saturación relativa se expresa como el ratio del contenido de agua que tiene la muestra entre el contenido que haría saturar la muestra cuando se hayan en equilibrio. En forma matemática:

$$SR = \frac{W_c}{W_{s-c}} = \frac{W_{oil}}{W_{s-oil}} \quad (2.2)$$

donde:

SR: Saturación relativa.

$W_c$ : Contenido de agua en el aislamiento celulósico.

$W_{s-c}$ : Valor de saturación del agua en el aislamiento celulósico.

$W_{oil}$ : Contenido de agua disuelto en el aceite.

$W_{s-oil}$ : Valor de saturación del agua en el aceite.

En sólidos, la saturación relativa se define como la presión ejercida por el sólido sobre el gas entre la presión ejercida por el vapor de agua saturado en el equilibrio [5]:

$$SR = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2.3)$$

donde:

SR: Saturación relativa.

$\rho_s$ : Presión parcial ejercida por el vapor de agua saturado.

$\rho$ : Presión parcial ejercida por el vapor de agua.

Agrupando términos, se define la saturación relativa de humedad como:

$$SR = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{W_c}{W_{s-c}} = \frac{W_{oil}}{W_{s-oil}} \quad (2.4)$$

donde:

SR: Saturación relativa.

$\rho_s$ : Presión de saturación de vapor de agua.

$\rho$ : Presión parcial de vapor de agua.

$W_c$ : Contenido de agua en el aislamiento celulósico.

$W_{s-c}$ : Valor de saturación del agua en el aislamiento celulósico.

$W_{oil}$ : Contenido de agua disuelto en el aceite.

$W_{s-oil}$ : Valor de saturación del agua en el aceite.

## 2.4. Dinámica de humidificación

Por lo general, la mayor parte de humedad de un transformador se encuentra contenida en los aislamientos sólidos de éste (cartón prensado, papel aislante y madera) en proporciones que pueden llegar a ser doscientas veces superior a la del aceite aislante.

El movimiento de la humedad es un proceso de difusión que se da a través de las superficies porosas de los aislantes sólidos y el aceite. El proceso de adsorción y desorción depende directamente de la variaciones de temperatura sufridas por el transformador y del gradiente de la presión del vapor de agua. Siempre se llega a un estado de equilibrio termodinámico, establecido por tres condiciones: equilibrio térmico (temperatura), equilibrio mecánico (presiones) y equilibrio químico. Un cambio en alguno de los tres parámetros causa un traspaso desde la humedad del papel al aceite o viceversa.

Al calentarse el transformador, parte de la humedad contenida en los aislamientos celulósicos migra al aceite siguiendo el proceso de difusión para conseguir el equilibrio. Al enfriarse el transformador de nuevo, el movimiento de las partículas de agua es el contrario, pero de una manera mucho más lenta, ya que para realizar este proceso de difusión se deben romper los enlaces entre moléculas de agua y aceite, necesitando más tiempo y energía que para el proceso de desorción. El incremento del tiempo de difusión del aceite al papel se traduce en un aumento permanente de la cantidad de agua contenida en el aceite cada vez que el transformador sufre un ciclo de calentamiento-enfriamiento.

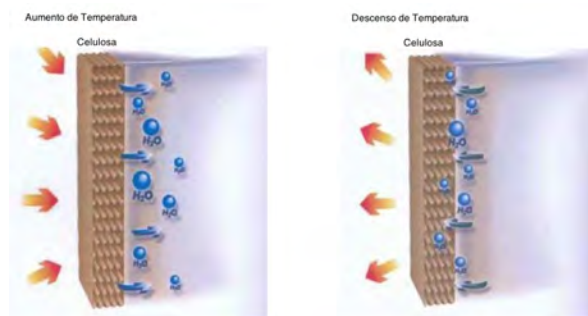


Figura 2.4: Flujo que sigue la humedad según la variación de temperatura en el transformador. Izquierda: Calentamiento. Derecha: Enfriamiento

Este efecto de adsorción y desorción de agua en los aislamientos se ve reflejado en las curvas de equilibrio.

## **2.5. Distribución de la humedad en los transformadores**

La humedad no se distribuye de igual forma en el transformador. Los materiales celulósicos son los que contienen la mayor parte de la humedad debido a la humedad residual que estos contienen y al carácter hidrófobo del aceite.

### **2.5.1. Distribución de la humedad según grosor del aislante**

A continuación se describe cómo se distribuye la humedad en los distintos aislantes de un transformador.

#### **2.5.1.A. Aislantes finos en zonas calientes**

La migración de la humedad es mucho más rápida en estas zonas debido a las altas temperaturas que alcanzan. Sin embargo, la cantidad de agua contenida en este tipo de aislante es mínima por lo que apenas aportan humedad al conjunto.

#### **2.5.1.B. Aislantes finos en zonas frías**

Estos elementos absorben muy bien la humedad y son considerados como la superficie principal de almacenaje de agua [5]. El agua que contienen es capaz de migrar rápidamente al aceite al estar en contacto directo con él. En distintas zonas de este tipo de aislante se pueden encontrar áreas donde la cantidad de agua puede ser entre un 1 y un 1.5 % superior (en relación a la cantidad absoluta de agua en el transformador) a la de cualquier otra parte de la máquina. Son considerados como la fuente principal de la dinámica de humidificación en el proceso de calentamiento-enfriamiento.

#### **2.5.1.C. Aislantes gruesos**

Aun siendo la mitad de la masa total del aislamiento sólido, apenas aportan humedad al conjunto total de la máquina ya que el tiempo medio de difusión de este tipo de material se

extiende durante varios años para las temperaturas de un transformador en funcionamiento normal [5].

#### **2.5.1.D. Aceite de transformador**

En general, el aceite de transformador es muy hidrófobo por lo que apenas retiene humedad desde el exterior o desde los aislantes celulósicos (los aceites vegetales, comparados con los minerales, absorben una cantidad enorme de humedad; incluso así, sigue siendo un elemento extremadamente hidrófobo). Este carácter tan poco polar ralentiza el proceso de humidificación del transformador hacia los elementos más sensibles al agua como el cartón o el papel de los arrollamientos.

### **2.6. Riesgos eléctricos derivados de un alto contenido de agua en el transformador**

Como se explica en [5], el riesgo de disrupción dentro de un transformador envejecido se encuentra en el aceite y no es los aislamientos sólidos. Principalmente se dan tres tipos de fallos eléctricos debido al mal estado del aceite:

- Arco eléctrico en los espacios sin aislantes celulósicos entre los aisladores y los pasa-tapas.
- Arco eléctrico entre los bobinados que no se encuentran divididos por barreras celulósicas
- Arco eléctrico entre conductores desnudos (sin aislamientos celulósico) especialmente en la entrada del aceite desde el refrigerador

Se ha de recalcar que la humedad en el aceite, junto con el aumento de la acidez de éste, son los motivos principales de envejecimiento del líquido aislante. La rigidez dieléctrica del aceite no depende de la cantidad total de agua que contiene el aceite sino de la saturación relativa de éste. Se debe a que una gran saturación relativa del aceite aumentan la conductividad de las partículas y permite que los ácidos se disocien dando lugar a los portadores iniciales de carga.

En la siguiente imagen se puede ver cómo decae la tensión de ruptura del aceite según aumenta la cantidad de partículas y la humedad relativa en éste:



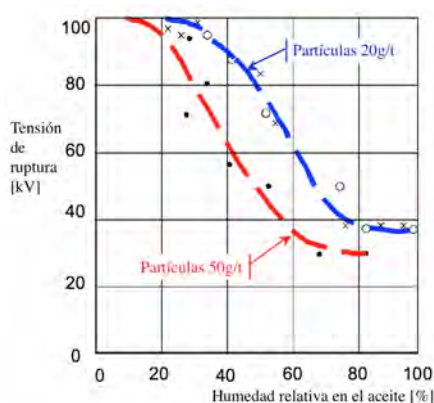


Figura 2.5: Tensión de ruptura según las partículas en el aceite y según la humedad relativa de éste. Extraído de [5]

## 2.7. Principales características de los tres aceites usados durante los experimentos

A continuación se mostrarán las principales características físicas, químicas y eléctricas de los tres aceites usados durante el presente Trabajo Fin de Grado.

Tabla 2.1: Características principales de los tres aceites usados durante las fases experimentales. Datos tomados de: [13] [14] [15] [16]

	BIOELECTRA™	BIOTEMP™	Nytro Taurus™
<b>Propiedades físico-químicas</b>			
Punto de inflamación (°C)	330	330	152
Densidad a 20°C(g/cm³)	0.91	0.91	0.870
Punto de congelación (°C)	-26	-15	-48
Conductividad térmica a 25°C(W/m.K)	0.1691	0.170	0.170
Contenido de agua inicial (ppm)	150	155	<20
Acidez (mg KOH/g)	0.05	0.02	0.01
<b>Propiedades eléctricas</b>			
Rigidez dieléctrica (kV)	65	32	70
<b>Propiedades medioambientales</b>			
Biodegradabilidad (%). 28 días.	85	99	20-60



## Capítulo 3

# Curvas de solubilidad de los aceites y curvas de equilibrio del sistema papel-aceite

La humedad que se encuentra presente en los transformadores se distribuye de forma uniforme entre papel y aceite según la dinámica de humidificación. Clark explica en [17] que el doble de humedad en el transformador reduce a la mitad la vida mecánica del papel aislante debido a la rápida descomposición de éste. Según se descompone el papel, se genera más agua que se suma a la ya existente en el transformador, acelerando el mecanismo de degradación del conjunto. Por otro lado, Fabre [18] sentencia que la degradación térmica del papel es proporcional al contenido de agua de éste.

Por lo tanto, es importante conocer la humedad que contendrá el sistema papel-aceite del transformador para así conocer el envejecimiento que éste está sufriendo. Ya que es difícil medir con exactitud la cantidad de agua contenida en los aislamientos sólidos del transformador, se han propuesto durante las últimas décadas distintas curvas de equilibrio del sistema papel-aceite. Éstas revelan la cantidad de agua contenida en el aislamiento celulósico a partir de la humedad contenida en el aceite del transformador (parámetro relativamente fácil de medir).

---

### 3.1. Curvas de solubilidad del aceite

Todos los aceites comerciales usados para aislar transformadores tienen en mayor o menor medida cierta afinidad por el agua. La cantidad de agua admitida por el aceite se mide en partes por millón (ppm), que se describe como mg de agua contenidos en el aceite por cada Kg de líquido aislante. Cuando se supera el límite de saturación del aceite, el agua no puede seguir disolviéndose en el aceite (ya que éste se encuentra saturado) y comienza a extenderse en forma de gotas.

El límite de saturación que tiene cada aceite varía según la temperatura y se modela según la conocida fórmula de la solubilidad de Arrhenius, que tiene la forma:

$$\log W_{s-oil} = A - \frac{B}{T} \quad (3.1)$$

donde:

$W_{s-oil}$  : Valor de saturación del agua en el aceite (ppm).

T: Temperatura (K).

A: Constante del aceite obtenida experimentalmente.

B: Constante del aceite obtenida experimentalmente.

Las curvas de solubilidad del agua en el aceite muestran en el eje de abscisas la temperatura y en el eje de ordenadas el contenido de agua en el aceite (ppm). Así, es posible determinar la cantidad de agua contenida en el aceite a cierta temperatura. A continuación se presenta una curva de solubilidad de un aceite mineral:

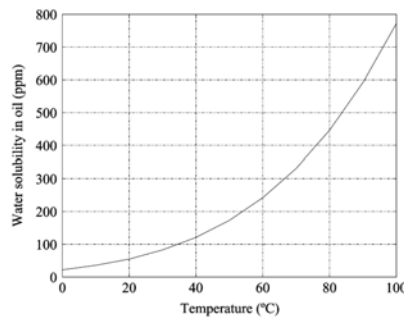


Figura 3.1: Curva de solubilidad de un aceite mineral. Tomada de [19]

El límite de saturación del aceite aumenta considerablemente según lo hace la temperatura. Esto es, el aceite admite mucha más agua cuanto mayor es la temperatura a la que está sometido.

Las curvas de solubilidad presentan un inconveniente importante. A medida que envejecen los aislantes, estos producen productos mucho más afines al agua que modifican por completo la curva de solubilidad obtenida en un principio. Según Mladenov [10], las fuentes de mayor influencia en el límite de saturación de los aceites son el número de acidez, el contenido aromático y la temperatura. Este autor propone así una ecuación que relaciona el límite de saturación del aceite con estos factores:

$$W_s = e^{[(A-B/T)+C \cdot A_r + D \cdot A_n]} \quad (3.2)$$

donde:

A= 16,2822.

B= 3698,27.

C= 0,02589.

D= 2,0991.

$W_s$ : Límite de solubilidad del agua en el aceite.

T: Temperatura absoluta (K).

$A_r$ : Contenido total de compuestos aromáticos (%).

$A_n$ : Número de acidez (KOH/g).

### 3.1.1. Métodos para calcular la solubilidad del agua en el aceite de transformador

A continuación se describirán los métodos más comunes usados por distintos autores para la determinación de las curvas de solubilidad del aceite.

#### 3.1.1.A. Análisis de la solubilidad siguiendo el estándar ASTM D1533

La norma ASTM D1533 [20] es el método más extendido entre los investigadores ya que es relativamente sencillo y a su vez efectivo. Este procedimiento es el usado durante los

experimentos llevados a cabo para este Trabajo Fin de Grado. Está basado en el uso del valorador coulométrico de Karl Fischer como se explicará en el Capítulo 4.

### 3.1.1.B. Análisis de la solubilidad siguiendo el estándar ASTM D4056-92

Este método es relativamente nuevo (1997), consiste en estimar la solubilidad del agua en los hidrocarburos del aceite a diferentes temperaturas basándose en valores de densidad, índice refractario y peso molecular siguiendo la norma ASTM D4056-92 [21].

Además de ser un método muy poco práctico, tiene como inconveniente que la máxima solubilidad que permite es de 1000 ppm, valor que en los aceites vegetales es superado considerablemente como se verá en el Capítulo 5.

### 3.1.1.C. Análisis de la solubilidad según el método propuesto por Du

Du propone un método alternativo a los anteriores en su tesis doctoral [22]. En el texto establece que para eliminar el error de una muestra con demasiado agua contenido en ella o con una muestra sin saturar se debe seguir la linealidad que existe entre la humedad relativa, el contenido de agua en el aceite y el límite de solubilidad de éste. Así se tiene que:

$$W_{\text{oil}} = W_{\text{s-oil}} \cdot \frac{HR}{100} \quad (3.3)$$

donde:

HR: Humedad relativa (%).

$W_{\text{oil}}$ : Contenido de agua en el aceite.

$W_{\text{s-oil}}$ : Valor de saturación del agua en el aceite.

Siguiendo esta ecuación, el equipo del ITM (Instituto Tecnológico de Massachusetts) propone medir, con dos sensores distintos, el contenido absoluto de humedad contenido en el aceite y por otro lado medir la humedad relativa del aceite de transformador, obteniéndose así por medio de la fórmula anterior el límite de solubilidad del aceite estudiado.

Con este método se excluye el problema de no saturar de manera adecuada los aceites para los distintos experimentos, pero tiene como inconveniente que los sensores han de estar

perfectamente calibrados para evitar cualquier medida errónea.

#### 3.1.1.D. Análisis de la solubilidad mediante el método de mínimos cuadrados

Se trata de un método de análisis *on-line*, i.e., que se puede aplicar mientras el transformador se encuentra en funcionamiento pudiendo así vigilar de cerca cómo varía la solubilidad de la máquina ante los cambios de temperatura.

Está basado en la instalación de dos sensores (de humedad y de temperatura) en el transformador. Con estos medidores se registran medidas continuas que posteriormente se analizan y aplicando el método de mínimos cuadrados se determina la curva de solubilidad [23]. Al igual que el anterior los sensores pueden desajustarse cometiéndose errores importantes de medida.

### 3.2. Curvas de equilibrio en el sistema papel-aceite

Las curvas de equilibrio muestran la humedad que contienen en el equilibrio a cierta temperatura el papel y el aceite. En el eje de abscisas se representa la humedad que contiene el papel en ppm. En el eje de ordenadas se tiene el porcentaje en peso de agua que contienen los aislantes celulósicos.

Los diagramas están basados en distintas curvas, cada una de ellas representando una temperatura distinta del sistema de aislamiento papel-aceite. A su vez, la representación está formada por dos juegos de curvas. Uno indica el proceso de adsorción de humedad del papel y el otro el proceso de desorción.

A continuación se presentan las curvas de equilibrio de Oommen [24], las más conocidas en la literatura:

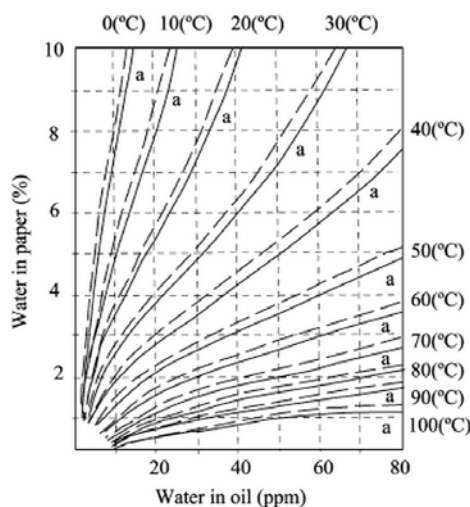


Figura 3.2: Curvas de equilibrio en el sistema papel-aceite de Oommen. Tomada de [19]

### 3.2.1. Contexto teórico sobre las curvas de equilibrio de humedad en sistemas de papel-aceite

Las curvas de equilibrio son una herramienta fundamental para conocer cómo envejece el transformador y sus aislamientos. Estas curvas se han dibujado siguiendo dos procedimientos distintos.

El primer procedimiento consiste en calcular la presión parcial de vapor de agua que contiene el aislamiento celulósico y, a partir de diversos experimentos, hallar una fórmula matemática que relacione el contenido de agua del aislamiento celulósico con la presión parcial del vapor de agua. Una vez obtenidos ambos parámetros, y con la ayuda de la ecuación de solubilidad relativa y del límite de solubilidad del aceite, se pueden hallar las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite.

El segundo procedimiento es más simple y por lo tanto, más utilizado. Consiste en documentar la humedad presente en el aceite en el sistema aceite-aire y la humedad presente en el papel aislante (papel Kraft) en el sistema papel-aire a cierta temperatura mediante el método de Karl Fischer. Una vez obtenidos ambos valores se trazan las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite. Este método será el utilizado para el cálculo de las curvas de equilibrio en el Capítulo 6.



### 3.2.2. Distintas curvas de equilibrio para presiones parciales de vapor de agua y contenido de humedad en el papel de transformador

A continuación se presentan los métodos usados por distintos autores para la determinación de las curvas de equilibrio para presiones parciales de vapor de agua y contenido de humedad en el papel [11] [25].

#### 3.2.2.A. Curvas de equilibrio de Piper. 1946

En el año 1946, Piper presentó sus curvas de equilibrio en sistemas de papel-aceite [26]. Estas consisten en una familia de curvas basadas en la presión parcial ejercida por el vapor de agua sobre el aislante celulósico y en la concentración de agua en equilibrio en el aislamiento. Con estos dos datos obtuvo la siguiente ecuación:

$$C_e = (\rho \cdot e^{\frac{6850}{T_k} - 21,92})^{0,75} \quad (3.4)$$

donde:

$C_e$ : Contenido de agua en equilibrio en el aislamiento (g H<sub>2</sub>O/g aislante celulósico).

$\rho$ : Presión parcial ejercida por el vapor de agua (mm Hg).

$T$ : Temperatura (K).

A partir del contenido de agua en equilibrio del papel empleando la ecuación de la saturación relativa de humedad (Ecuación 2.2) y conociendo el límite de solubilidad del aceite, es posible conocer la humedad que contiene el aceite y así hallar las curvas de equilibrio del sistema.

#### 3.2.2.B. Curvas de equilibrio de Fessler. 1987

En 1987 Fessler y su equipo necesitaban una fórmula muy precisa para recrear un modelo sobre la creación de burbujas en los transformadores. Tras ver que las diferencias en el estado del arte eran notables, decidieron crear su propio modelo de curvas de equilibrio para transformadores aislados en papel-aceite [27].

Para calcular la curva midieron directamente el contenido de humedad en el papel y la presión parcial que ejercía el vapor de agua sobre el aislante celulósico. Al igual que en el caso de Piper, extrapolaron los datos gracias a la fórmula de la solubilidad relativa y a los datos del límite de solubilidad del aceite.

La fórmula obtenida para las curvas de equilibrio es la siguiente:

$$C_e = 2,173 \cdot 10^{-7} \cdot \rho^{0,6685} \cdot e^{\frac{4725,6}{T_k}} \quad (3.5)$$

donde:

$C_e$ : Contenido de agua en equilibrio en el aislamiento (g H<sub>2</sub>O/g aislante celulósico).

$\rho$ : Presión parcial del vapor de agua (atm).

$T$ : Temperatura (K).

### 3.2.2.C. Curvas de equilibrio de M. Scala. 2004

Estas curvas son el último aporte a los distintos métodos para trazar curvas de equilibrio [28]. Como en los dos métodos anteriores, se basa en calcular la presión parcial ejercida por el vapor de agua en el aislamiento de papel y el contenido de agua en éste. Una vez obtenidos estos datos se obtiene mediante extrapolación de la ecuación de solubilidad relativa y del valor límite de la solubilidad del aceite las curvas de equilibrio. Scala calcula las siguiente fórmulas para aproximar las curvas de equilibrio:

$$C_e = 0,5 \cdot W_{s-e} \cdot \left[ \frac{\rho}{\rho_{sat}}^{\frac{1377+5 \cdot T}{2635-T}} + \frac{\rho}{\rho_{sat}}^{7,1} \right] \quad (3.6)$$

$$W_{s-c} = 20,68 - 0,0608 \cdot T \quad (3.7)$$

donde:

$C_e$ : Contenido de agua en equilibrio en el aislamiento (% en peso del papel secado).

$\rho$ : Presión parcial del vapor de agua (Pa).

$\rho_s$ : Presión parcial ejercida por el vapor de agua saturado (Pa).

$W_{s-c}$ : Valor de saturación del agua en el aislamiento celulósico (% en peso del papel secado).

T: Temperatura a la que se toma la muestra del papel (K).

### **3.2.3. Distintas curvas de equilibrio para contenido de humedad en el papel y en el aceite frente a humedad relativa del sistema**

A continuación se detallan los métodos usados por distintos autores para obtener las curvas de equilibrio a partir del contenido de humedad en el papel y en el aceite frente a la humedad relativa del transformador.

#### **3.2.3.A. Curvas de equilibrio de Fabre y Pichon o curvas de Norris. 1960**

Fueron las curvas más usadas hasta la aparición de las curvas de Oommen en 1983 [22]. Normalmente son conocidas como curvas de Norris ya que fue éste último el que, tras la publicación de un artículo en 1963, las dio a conocer.

El método usa la reacción de Karl Fischer para calcular tanto el contenido de agua del aceite como el contenido de agua del papel. Para calcular las curvas se basa en la ley del equilibrio de humedades, afirmando que la humedad relativa ha de ser la misma en el aceite y en el aire que tiene contacto con éste a la misma temperatura [18].

#### **3.2.3.B. Curvas de equilibrio de Oommen. 1983**

Son las más usadas actualmente y siguen estando en vigor como las más acertadas [25]. El método de Oommen [24] se basa en el principio de que las curvas de equilibrio representan la misma saturación relativa (Ecuación 2.2) para el aceite y para el papel de transformador a la misma temperatura.

Además, incluyó dos curvas distintas en las curvas de equilibrio: la curva de absorción (difusión de la humedad hacia la celulosa) y la curva de desorción (difusión de la humedad hacia fuera de la celulosa). Para la misma temperatura se observan dos puntos distintos de contenido de humedad tanto para aceite como para el papel dependiendo del proceso que esté sufriendo

el transformador (calentamiento o enfriamiento). La curva de desorción será siempre más alta que la curva de absorción.

### **3.2.3.C. Curvas de equilibrio de Griffin. 1988**

Griffin usó el mismo método que Oommen valiéndose de la ecuación de Fessler (Ecuación 3.5) para calcular así la presión de vapor de agua y luego, mediante la ecuación de la humedad relativa (Ecuación 2.1) obtener la humedad relativa. Dibujó entonces las curvas de cantidad de agua en el aceite frente a la humedad relativa y la cantidad de agua en el papel frente a la humedad relativa para distintas temperaturas, obteniendo así las curvas de equilibrio del sistema [29].

### **3.2.3.D. Curvas de equilibrio del ITM (Instituto Tecnológico de Massachusetts). 1999**

El Instituto Tecnológico de Massachusetts basó sus estudios en ampliar el rango de cantidad de agua contenida en el aceite, ya que hasta ese momento, las curvas de equilibrio de humedad tenían como límite 100 ppm. Desarrollaron dos métodos distintos para dibujar las curvas basándose en el método desarrollado por Oommen y en las curvas de Jeffries (que son una corrección de las curvas de Piper) [22]. Lograron ampliar el rango hasta las 800 ppm de agua contenida en el aceite.

## Capítulo 4

# Metodología experimental

En este capítulo se explicarán los dos métodos utilizados para la determinación de la humedad relativa de los aceites de transformador. Al principio del desarrollo de este TFG experimental se desarrollaron durante semanas trabajos en el laboratorio de Caracterización de dieléctricos de la Universidad Carlos III de Madrid. Ambos métodos se fundamentan en la determinación de la cantidad de agua contenida en el aceite mediante el método conocido como valoración coulométrica automática de Karl Fischer.

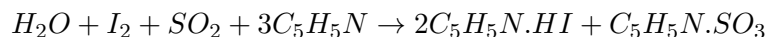
Todo los ensayos se realizaron siguiendo la norma UNE-EN 60475 [30], dejando las muestras reposar durante largos periodos de tiempo en la cámara climática alcanzando así el equilibrio. Se presentan por tanto en este capítulo dos métodos distintos basados en la misma norma que aportarán una serie de resultados igualmente válidos.

---

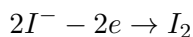
#### 4.1. Determinación de la concentración de humedad en líquidos aislantes por valoración coulométrica automática de Karl Fischer

La determinación de la cantidad de agua contenida en una muestra de aceite mediante el método Karl Fischer se rige en su totalidad por la norma UNE-EN 60814 [31]. Hay dos maneras de realizar la valoración automática de la cantidad de agua contenida en el aceite mediante Karl Fischer: por medio de valoración volumétrica y a través de valoración coulométrica. El método usado para la fase experimental fue la valoración coulométrica.

En la valoración coulométrica se registra la cantidad de carga eléctrica necesaria para la reacción entre la cantidad de agua contenida en la muestra y el aceite [11]. La muestra de aceite extraída se vierte en el recipiente de valoración donde se tiene una reacción del agua con el yodo, una base orgánica, dióxido de azufre y un alcohol en un disolvente orgánico. La reacción que se genera en el recipiente de valoración es la siguiente:



Por otro lado, se tiene que la cantidad de yodo que se genera mediante electrolisis es proporcional a la carga eléctrica según la ley de Faraday [31].



Se observa que, en la reacción que acontece en el recipiente, cada mol de yodo generado reacciona estequiométricamente con un mol de agua, obteniéndose así que, 10,72 Coulombs son igual a 1mg de agua contenido en la muestra. De manera proporcional se obtienen los miligramos de agua contenidos en el aceite.

## 4.2. Equipos usados a lo largo de los experimentos

Durante todos los ensayos se utilizaron dos equipos fundamentales: el valor coulométrico de Karl Fischer y la cámara climática para el acondicionamiento de las muestras.

### 4.2.1. Valorador coulométrico de Karl Fischer

El modelo usado durante los experimentos es el 756/831 de la marca Metrohm. Antes de tomar las muestras de la cámara climática se realizaban tres blancos en el valorador para así no cometer errores y se ajustaba la velocidad de agitación del vaso.

Tras la recogida de las muestras, se pesaba la jeringuilla con el aceite y restándole el peso de la jeringuilla vacía se hallaba el peso neto de la muestra de aceite que se introducía en el recipiente. Este peso era introducido en el analizador mediante el panel de controles. Posteriormente, el aceite se inyectaba mediante una jeringuilla en el recipiente de valoración.

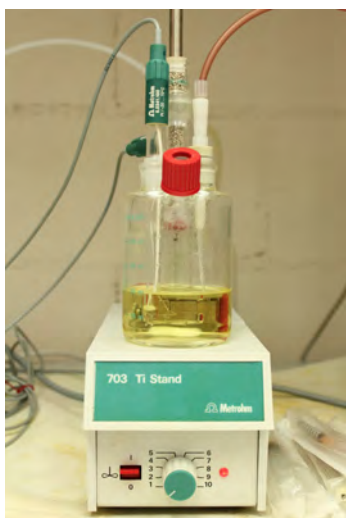


Figura 4.1: Recipiente de valoración

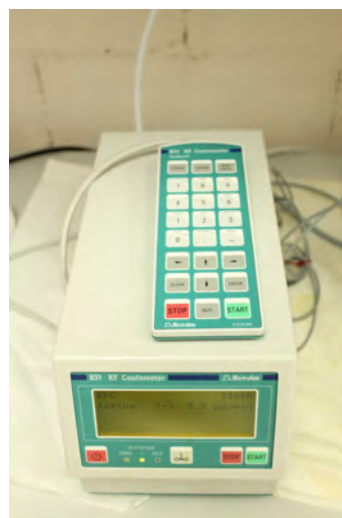


Figura 4.2: Analizador de contenido de agua en el aceite de transformador

Una vez introducida la muestra en la pantalla del analizador aparecía una curva mostrando la curva de contenido de agua y la deriva que sufría el reactivo debido a la incorporación del aceite humectado. Cuando la deriva era mínima se obtenía la humedad contenida en la muestra de aceite inyectada.

#### 4.2.2. Cámara climática

El modelo usado durante los experimentos es el PR-920 de la marca INELTEC. Sus características principales son:

- Rango de temperaturas:  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ .
- Rango de humedad: 10 % al 100 %.
- Volumen de la cámara climática: 81 litros.

En la cámara se introducían los vasos con el aceite y se dejaban reposar a la temperatura y humedad requeridos para cada experimento. A la izquierda de la fotografía se puede observar el panel de programación de la cámara con las pantallas de control de temperatura y humedad del interior.



Figura 4.3: Cámara climática usada para los experimentos

#### 4.3. Metodología aplicada a la toma de muestras en los laboratorios

Lo más importante durante todos los ensayos era prevenir la contaminación de las muestras. Para ello, se evitaba por completo la exposición directa a la atmósfera por tiempos



prolongados y la exposición al sol directa. Además, para eludir cualquier tipo de contaminación entre aceites se esterilizaban todos los equipos usados después de cada uso con cada uno de los aceites: jeringas, recipientes y botellas, entre otros, mediante etanol y tras esto se procedía al secado de los utensilios en una estufa a 120°C. Por último, para no afrontar posibles contaminaciones de los técnicos, el uso de guantes estériles de látex era obligatorio para cualquier fase del proceso.

El procedimiento experimental comenzaba con la preparación de la cámara climática para albergar las muestras. Después de un periodo de tres días en la cámara climática, donde el aceite alcanzaba el equilibrio, se procedía a evaluar las muestras. Con una jeringa previamente esterilizada se recogía la muestra de 5 ml de aceite en un vial. Es necesario resaltar que, para no contaminar las muestras, se usaba una jeringa distinta por cada aceite. Tras haber recogido las tres muestras de aceite en viales separados, identificarlas y registrarlas, eran enviadas al técnico de laboratorio. Éste las evaluaba y registraba algunas horas después de haber sido extraídas.

#### 4.4. Primer método experimental

Durante el primer método experimental, se fijó la humedad relativa de la cámara al 100 % para así alcanzar el nivel de saturación de contenido de agua en los aceites. Se varió también periódicamente la temperatura de la cámara (30, 40, 50, 60, 70 y 80°C) obteniendo así la curva de solubilidad de los aceites.

Una vez conseguidos los datos de la humedad de los aceites en la saturación se reflejan en tablas como las del Capítulo 5 y, mediante el método de mínimos cuadrados, se ajustan a una curva según la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3.1).

#### 4.5. Segundo método experimental

Con este procedimiento se hallan los valores de cantidad de agua de los aceites a distintas temperaturas (30, 40, 50, 60, 70 y 80°C) y a distintas humedades relativas (30, 50, y 70 %). A partir de estos datos se pueden extrapolar los datos de humedad a cualquier hu-

medad relativa de manera lineal como explica Jovalekic [32]. De esta manera, extrapolando al 100 % de humedad relativa, se obtienen los valores para la determinación de las curvas de solubilidad de los aceites.

Este método se comienza a utilizar para evitar la precipitación de agua en los viales de aceite al estar la cámara climática a una humedad alta y a elevadas temperaturas. Además, la cámara climática usada durante los experimentos presenta un rango de trabajo limitado, no pudiendo alcanzar altas humedades a temperaturas elevadas. Con este método, se puede extrapolar la humedad a cualquier valor, pudiendo así humectar el aceite a temperaturas mucho más altas.

Una vez obtenidos los valores de la humedad de los aceites en saturación, se construyen las gráficas mediante el método de mínimos cuadrados al igual que se hacía en el método anterior.

## Capítulo 5

# Determinación de las curvas de solubilidad de los aceites

En este capítulo se mostrarán las curvas de solubilidad de los tres aceites halladas experimentalmente, la comparación entre las curvas de los distintos aceites y la comparación con las curvas teóricas de los propios fabricantes.

Primeramente se presentará una tabla con los valores de la cantidad de agua contenida en el aceite obtenidos en el laboratorio a cierta temperatura. A partir de los datos hallados, se ajustará una curva que sigue la expresión de Arrhenius (Ecuación 3.1) obteniendo así los coeficientes A y B de esta ecuación.

Es importante señalar que los valores de los dos aceites vegetales, BIOELECTRA<sup>TM</sup> y BIOTEMP<sup>TM</sup>, deberán ser muy similares entre ellos, ya que ambos se elaboran a partir de semillas de girasol, mientras que el aceite mineral obtendrá resultados bastante menores en cantidad de agua absorbida.

Finalmente, se mostrarán tablas y gráficas comparando los valores de la cantidad de agua en cada aceite obtenidos para cada aceite y por cada método.

---

### 5.1. Metodología para la determinación de las curvas de solubilidad del aceite

Una vez obtenidos los valores de la cantidad de agua contenida en el aceite mediante el método de Karl Fischer, estos son ordenados y mediante la herramienta *Curve fitting tool* de MATLAB® se ajustan a una curva, hallándose sus coeficientes característicos A y B de la ecuación de solubilidad, distintos para cada tipo de aceite.

En las gráficas, el eje de abscisas indica la temperatura y el eje de ordenadas la humedad contenida en el aceite en saturación. La curva de solubilidad se modela según la ley de Arrhenius (Ecuación 3.1).

### 5.2. Determinación de las curvas de solubilidad de los aceites mediante el primer método experimental

En esta sección se expondrán los resultados obtenidos mediante el primer método experimental para los tres aceites. Como ya se explicó anteriormente, se realizó manteniendo la humedad relativa de la cámara climática al 100 % y aumentando la temperatura de ésta progresivamente.

5.2.1. Curva de solubilidad de BIOELECTRA™

Los valores obtenidos de la cantidad de agua contenida en el aceite son los siguientes:

Tabla 5.1: Contenido de agua en el aceite según temperatura BIOELECTRA™.

Fecha	Temperatura en la cámara (°C)	Humedad relativa de la cámara (%)	Contenido de agua (ppm)
24/03/2014	30	100	568,60
25/03/2014	40	100	681,80
26/03/2014	50	100	874,60
27/03/2014	60	100	1182,70
31/03/2014	70	100	1645,10
01/04/2014	80	100	1881,50

Se dibuja la curva con los datos obtenidos en el laboratorio y mediante MATLAB® se aproxima a una curva, para así obtener los valores A y B de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3.1).

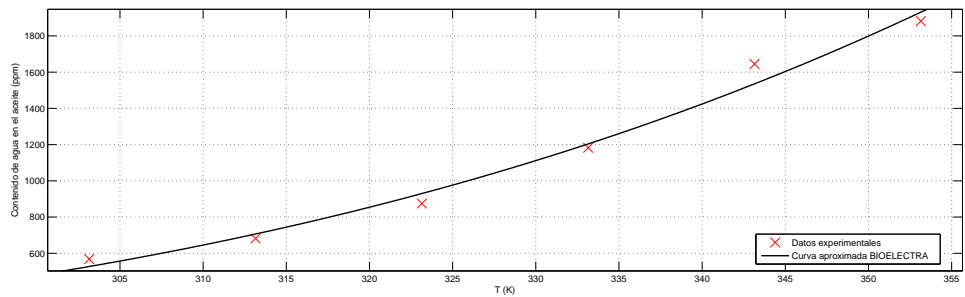


Figura 5.1: Curva de solubilidad experimental de BIOELECTRA™.

Para BIOELECTRA™ los valores A y B de la ecuación de Arrhenius son:

Tabla 5.2: Valores aproximados mediante MATLAB de la Ecuación de Arrhenius para BIOELECTRA™.

A	B
6,634	-1184

### 5.2.2. Curva de solubilidad de BIOTEMP™

Los valores obtenidos de la cantidad de agua contenida en el aceite son los siguientes:

Tabla 5.3: Contenido de agua en el aceite según temperatura BIOTEMP™.

Fecha	Temperatura en la cámara (°C)	Humedad relativa de la cámara (%)	Contenido de agua (ppm)
24/03/2014	30	100	1133,10
25/03/2014	40	100	1402,40
26/03/2014	50	100	1644,20
27/03/2014	60	100	2003,30
31/03/2014	70	100	2337,20
01/04/2014	80	100	2651,20

Como en el caso anterior, se dibuja la curva con los datos obtenidos experimentalmente y se aproximan a una curva, para así obtener los valores A y B de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3.1).

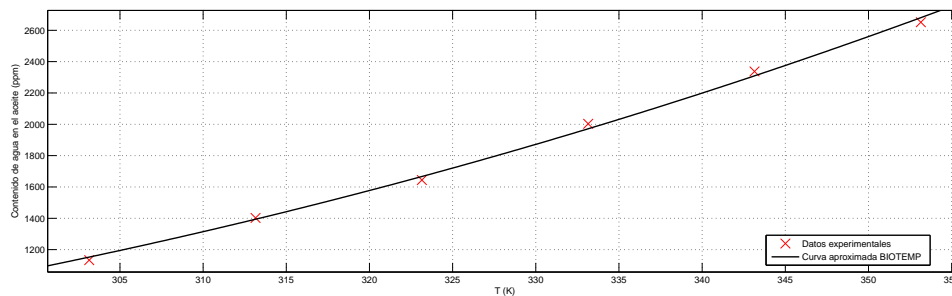


Figura 5.2: Curva de solubilidad experimental de BIOTEMP™.

Para BIOTEMP™ los valores A y B de la ecuación de Arrhenius son:

Tabla 5.4: Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para BIOTEMP™.

A	B
5,685	-796

### 5.2.3. Curva de solubilidad de Nytro Taurus<sup>TM</sup>

Los valores obtenidos de la cantidad de agua contenida en el aceite son los siguientes:

Tabla 5.5: Contenido de agua en el aceite según temperatura Nytro Taurus<sup>TM</sup>.

Fecha	Temperatura en la cámara (°C)	Humedad relativa de la cámara (%)	Contenido de agua (ppm)
24/03/2014	30	100	46,00
25/03/2014	40	100	54,40
26/03/2014	50	100	75,40
27/03/2014	60	100	117,30
31/03/2014	70	100	167,40
01/04/2014	80	100	294,40

A partir de estos valores, y como en los casos anteriores mediante MATLAB® se dibuja la gráfica y se obtienen los coeficientes de solubilidad de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3.1).

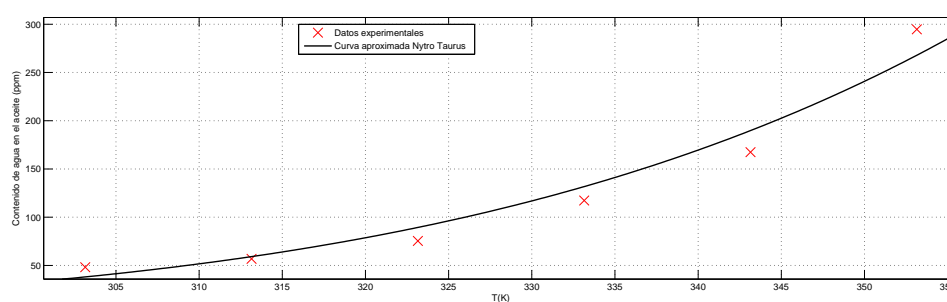


Figura 5.3: Curva de solubilidad experimental de Nytro Taurus<sup>TM</sup>.

Los valores obtenidos experimentalmente de los coeficientes de Arrhenius A y B son:

Tabla 5.6: Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para Nytro Taurus™

A	B
7,180	-1706

### 5.3. Determinación de las curvas de solubilidad de los aceites mediante el segundo método experimental

Seguidamente se presenta el segundo método experimental. En esta serie de experimentos la temperatura de la cámara se varió desde los 30°C a los 80°C. Para evitar la precipitación de agua en las muestras, la humedad relativa de la cámara se fijó a tres humedades relativas distintas (30, 50 y 70 %), extrapolando después a todas las humedades relativas según la linealidad explicada por Jovalekic [32].

#### 5.3.1. Curva de solubilidad de BIOELECTRA™

Los valores obtenidos mediante extrapolación de la cantidad de agua contenida en el aceite a una temperatura y humedad dadas son:

Tabla 5.7: Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para BIOELECTRA™

Temperatura (°C)/ Cantidad de agua contenida en el aceite (ppm)	Humedad relativa (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	56,08	112,16	148,80	224,32	284,80	336,48	386,70	448,64	504,72	560,80
40	68,01	136,02	204,03	272,04	340,05	408,06	476,07	544,08	612,09	680,10
50	88,52	177,04	265,56	354,08	442,60	531,12	619,64	708,16	796,68	885,20
60	118,73	237,46	356,19	474,92	593,65	712,38	831,11	949,84	1068,57	1187,30
70	162,14	324,28	486,42	648,56	810,70	972,84	1134,98	1297,12	1459,26	1621,40
80	182,52	365,04	547,56	730,08	912,60	1095,12	1277,64	1460,16	1642,68	1825,20

Se dibuja la curva con los datos obtenidos a una humedad relativa del 100 % y mediante



MATLAB® se aproximan a una curva. Obteniendo así los valores A y B de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3.1).

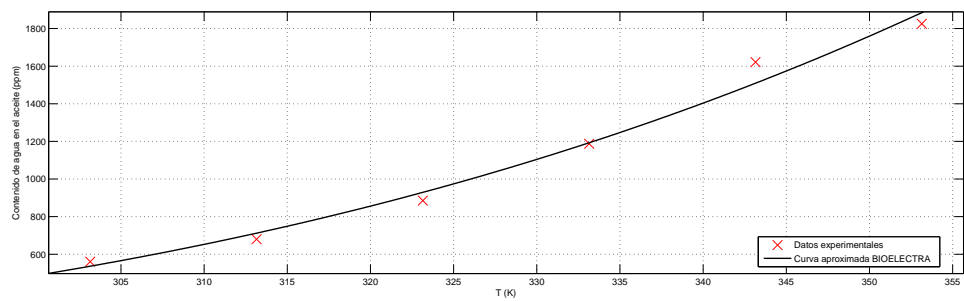


Figura 5.4: Curva de solubilidad experimental de BIOELECTRA™.

Para BIOELECTRA™ los valores A y B de la expresión de Arrhenius son:

Tabla 5.8: Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para BIOELECTRA™.

A	B
6,584	-1169

5.3.2. Curva de solubilidad de BIOTEMP™

Los valores obtenidos mediante extrapolación de la cantidad de agua contenida en el aceite a una temperatura y humedad dadas son:

Tabla 5.9: Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para BIOTEMP™

Temperatura (°C)/ Cantidad de agua contenida en el aceite (ppm)	Humedad relativa (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	104,82	220,98	336,50	453,30	574,58	685,62	794,80	917,94	1034,10	1152,80
40	139,74	279,48	419,22	558,96	698,70	838,44	978,18	1117,92	1257,66	1397,40
50	167,37	334,74	502,11	669,48	836,85	1004,22	1171,59	1338,96	1506,33	1673,70
60	200,33	400,66	600,99	801,32	1001,65	1201,98	1402,31	1602,64	1802,97	2003,30
70	236,31	472,62	708,93	945,24	1181,55	1417,86	1654,17	1890,48	2126,79	2363,10
80	266,14	532,28	798,42	1064,56	1330,70	1596,84	1862,98	2129,12	2395,26	2661,40

Como en el caso anterior, con los datos de humedad extrapolados al 100 % de humedad

relativa y mediante MATLAB® se aproximan estos a una curva. Obteniendo así los valores A y B de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3.1).

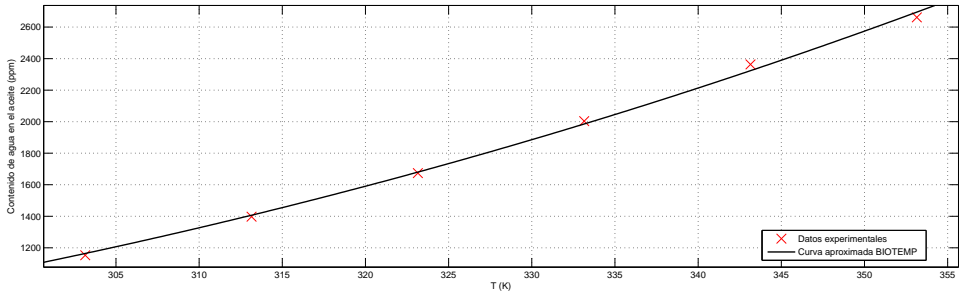


Figura 5.5: Curva de solubilidad experimental de BIOTEMP™.

Para BIOTEMP™ los valores A y B obtenidos mediante la expresión de Arrhenius son:

Tabla 5.10: Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para BIOTEMP™.

A	B
5,671	-791

5.3.3. Curva de solubilidad de Nytro Taurus™

Los valores obtenidos mediante extrapolación de la cantidad de agua contenida en el aceite a una temperatura y humedad dadas son:

Tabla 5.11: Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para Nytro Taurus™

Temperatura (°C)/ Cantidad de agua contenida en el aceite (ppm)	Humedad relativa (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	4,87	9,74	16,30	19,48	24,60	29,22	34,40	38,96	43,83	48,70
40	5,61	11,22	16,83	22,44	28,05	33,66	39,27	44,88	50,49	56,10
50	7,60	15,20	22,80	30,40	38,00	45,60	53,20	60,80	68,40	76,00
60	11,71	23,42	35,13	46,84	58,55	70,26	81,97	93,68	105,39	117,10
70	16,80	33,60	50,40	67,20	84,00	100,80	117,60	134,40	151,20	168,00
80	29,79	59,58	89,37	119,16	148,95	178,74	208,53	238,32	268,11	297,90

Por último, y al igual que en los casos anteriores, con el valor obtenido de cantidad de agua contenida en el aceite a una humedad relativa del 100 % y a cierta temperatura mediante MATLAB® se dibuja la gráfica y se obtienen los coeficientes de solubilidad de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3.1).

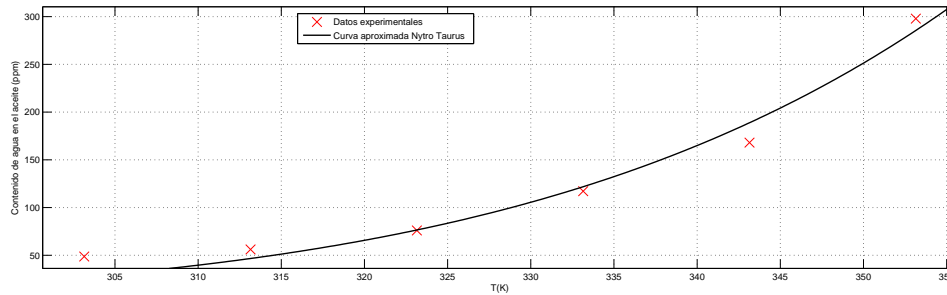


Figura 5.6: Curva de solubilidad experimental de Nytro Taurus™.

Para Nytro Taurus™ los valores A y B obtenidos de la ecuación de Arrhenius son:

Tabla 5.12: Valores aproximados mediante MATLAB® de la Ecuación de Arrhenius para Nytro Taurus™

A	B
7,157	-1683

## 5.4. Comparación y discusión de los resultados obtenidos

En esta sección se presentarán mediante tablas y gráficas los resultados obtenidos a través de los dos métodos experimentales y los valores teóricos para los tres aceites, pudiendo así comparar los resultados de manera más sencilla.

#### 5.4.1. Comparación de los resultados obtenidos para BIOELECTRA™

En esta sección se muestra la tabla resumen con los datos experimentales obtenidos en el laboratorio para ambos métodos y los coeficientes de Arrhenius teóricos y los hallados experimentalmente. Más adelante se presentan las curvas experimentales y la curva teórica.

Tabla 5.13: Contenido de agua en el aceite según temperatura y método, coeficientes A y B experimentales y teóricos de la ecuación de Arrhenius para BIOELECTRA™

Temperatura (°C)/ Contenido de agua en el aceite (ppm)	BIOELECTRA™		
	Primer método	Segundo método	Valores teóricos
30	568,60	560,80	
40	681,80	680,10	
50	874,60	885,20	
60	1182,70	1187,30	
70	1645,10	1621,40	
80	1881,50	1825,20	

A	6,63	6,58	5,73
B	-1184,00	-1169,00	-804,42

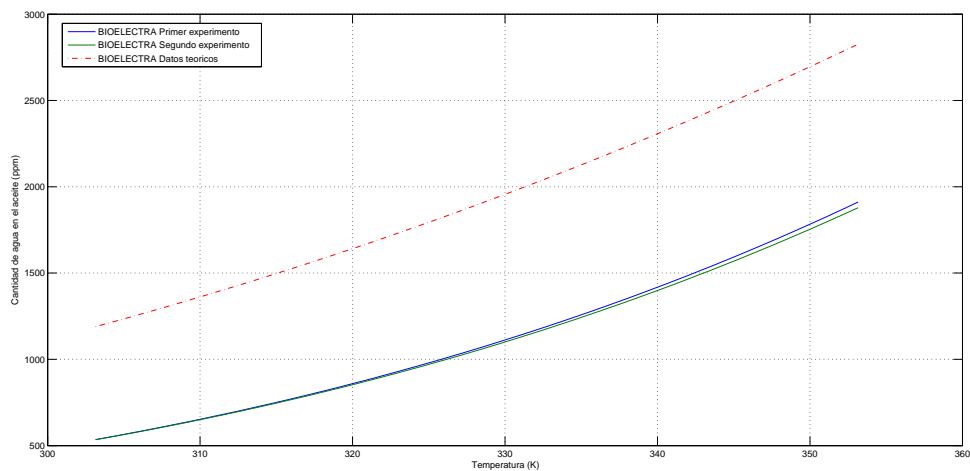


Figura 5.7: Comparación entre las curvas de solubilidad de BIOELECTRA™ obtenidas mediante ambos métodos y la curva teórica de solubilidad

### 5.4.2. Comparación de los resultados obtenidos para BIOTEMP™

Como en el caso anterior, se presenta la tabla con los datos experimentales para ambos métodos y los coeficientes A y B teóricos de BIOTEMP™. Posteriormente se mostrarán las curvas de solubilidad de los dos procedimientos junto con la curva de solubilidad teórica.

Tabla 5.14: Contenido de agua en el aceite según temperatura y método, coeficientes A y B experimentales y teóricos de la ecuación de Arrhenius para BIOTEMP™

Temperatura (°C)/ Contenido de agua en el aceite (ppm)	BIOTEMP™		
	Primer método	Segundo método	Valores teóricos
30	1133,10	1152,80	
40	1402,40	1397,40	
50	1644,20	1673,70	
60	2003,30	2003,30	
70	2337,20	2363,10	
80	2651,20	2661,40	

A	5,69	5,67	5,71
B	-796,00	-791,00	-802,00

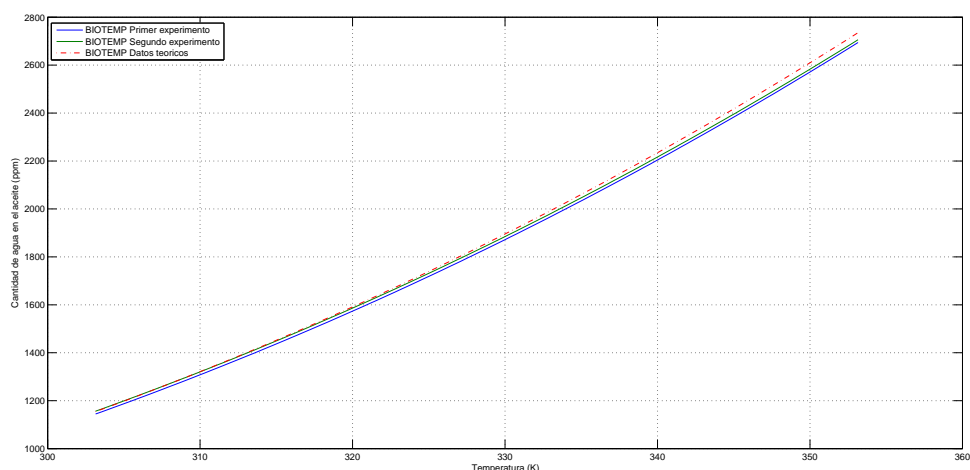


Figura 5.8: Comparación entre las curvas de solubilidad de BIOTEMP™ obtenidas mediante ambos métodos y la curva teórica de solubilidad

### 5.4.3. Comparación de los resultados obtenidos para Nytro Taurus<sup>TM</sup>

Primeramente se presentará la tabla con resultados conseguidos durante los experimentos y los valores teóricos y, más tarde, se mostrará la comparación de las curvas de solubilidad obtenidas por cada método junto con la curva de solubilidad teórica.

Tabla 5.15: Contenido de agua en el aceite según temperatura y método, coeficientes A y B experimentales y teóricos de la ecuación de Arrhenius para Nytro Taurus<sup>TM</sup>

Temperatura (°C)/ Contenido de agua en el aceite (ppm)	Nytro Taurus <sup>TM</sup>		
	Primer método	Segundo método	Valores teóricos
30	46,00	48,70	
40	54,40	56,10	
50	75,40	76,00	
60	117,30	117,10	
70	167,40	168,00	
80	294,40	297,90	
A	7,18	7,16	7,14
B	-1706,00	-1683,00	-1677,30

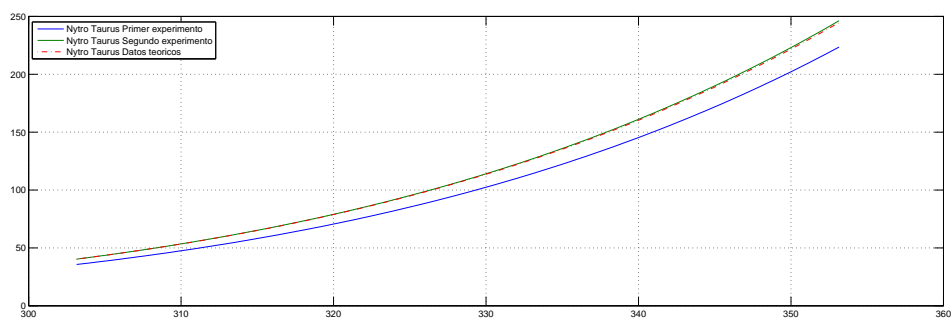


Figura 5.9: Comparación entre las curvas de solubilidad de Nytro Taurus<sup>TM</sup> obtenidas mediante ambos métodos y la curva teórica de solubilidad

#### 5.4.4. Comparación de las curvas de solubilidad entre los diferentes aceites y entre los diferentes métodos con las curvas teóricas de solubilidad

Finalmente, se presentan las curvas de solubilidad obtenidas experimentalmente por cada uno de los dos métodos y para cada aceite junto con las curvas teóricas de cada aceite.

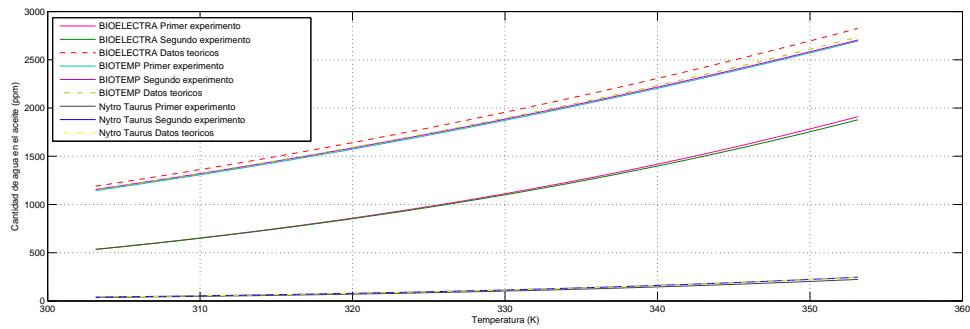


Figura 5.10: Comparación entre las curvas de solubilidad de los diferentes aceites por cada método con las curvas teóricas

Las curvas de BIOTEMP<sup>TM</sup> obtenidas experimentalmente son muy similares a la teórica aportada por el fabricante. Al igual que para BIOTEMP<sup>TM</sup>, la curva teórica del aceite mineral se superpone a las halladas experimentalmente a lo largo de todo el recorrido. Para el aceite vegetal BIOELECTRA<sup>TM</sup>, las curvas obtenidas experimentalmente difieren de la curva teórica. Se considera que esta diferencia es consecuencia de la extrapolación de los valores de humedad (usada para el cálculo de los coeficientes A y B de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3.1) para el modelo teórico) de los escasos ensayos de solubilidad llevados a cabo por el fabricante, ya que éste no aporta una ecuación de solubilidad del aceite.

Al haber verificado con los otros dos aceites, BIOTEMP<sup>TM</sup> y Nytro Taurus<sup>TM</sup>, las curvas de solubilidad halladas mediante los métodos experimentales, se dan como correctos tanto el procedimiento experimental usado para la obtención de las curvas de solubilidad como los coeficientes de Arrhenius (Ecuación 3.1) para BIOELECTRA<sup>TM</sup>.

Hay que destacar la notable diferencia en la capacidad de absorber agua de los diferentes aceites tal y como era esperado. El aceite mineral absorbe una cantidad bastante inferior a los aceites vegetales debido a su composición química que le dota de un carácter menos polar.

Se concluye entonces que las curvas de solubilidad determinadas por ambos métodos experimentales son válidas. El uso del segundo método experimental es preferible, ya que durante primera fase experimental del TFG se observó como algunas muestras de aceite precipitaban ante los cambios bruscos de temperatura. Al usar humedades relativas inferiores, como en el segundo método experimental, se evita la precipitación de las muestras que podrían llevar a valores de humedad contenida en el aceite erróneos. Por este motivo, para el cálculo de las curvas de equilibrio del siguiente capítulo se usarán las curvas de solubilidad halladas durante el segundo método experimental.



## Capítulo 6

# Determinación de las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite

En este capítulo se presentarán las curvas de equilibrio de los tres aceites usados a lo largo de este TFG.

Primeramente, se explicará el método usado para la determinación de las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite. Posteriormente, se presentarán las tablas con los datos de las curvas de equilibrio del sistema papel-aire de Oommen y las tablas con los datos de las curvas de equilibrio del sistema aceite-aire, que son las mismas tablas que las usadas para hallar las curvas de solubilidad del aceite en el segundo método experimental. Al combinar ambas matrices de datos y dibujar el resultado se obtienen las curvas de equilibrio para el sistema papel-aceite de transformador.

Finalmente, se presentarán las curvas de equilibrio para cada uno de los aceites.

### 6.1. Metodología para la determinación de las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite de transformador

Una vez obtenida la curva de solubilidad del aceite, esto es, la curva con la humedad contenida en el aceite cuando éste se encuentra en saturación a distintas temperaturas, es posible hallar el contenido de agua a cualquier humedad relativa de manera lineal tal y como

---

explica Jovalekic en [32].

Los resultados obtenidos mediante el segundo método experimental se extrapolan a las distintas condiciones de humedad relativa (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 %). De esta manera se consigue una matriz 6x10, siendo las filas las temperaturas desde 30 a 80°C y las columnas las distintas humedades relativas.

Para hallar las curvas de equilibrio esta matriz debe combinarse con la matriz de datos del contenido de humedad para el sistema papel-aire mostrada por Oommen en [24]. Con ambas matrices y siguiendo el principio por el que la saturación relativa en el aceite y en el papel a la misma temperatura en el equilibrio ha de ser la misma, se obtienen las curvas de equilibrio de humedad en el sistema papel-aceite de transformador [24].

## 6.2. Valores en el equilibrio para el sistema papel-aire según Oommen

Se muestran a continuación los valores presentados del equilibrio papel-aire por Oommen en [24], y que servirán para elaborar las curvas de equilibrio.

Tabla 6.1: Valores en equilibrio para el sistema papel-aire según Oommen

Temperatura (°C)/ Contenido de agua en el papel (% del peso)	Humedad relativa (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	2,44	3,47	4,48	5,34	6,31	7,41	8,57	10,18	13,37	25,46
40	2,02	2,94	3,81	4,60	5,48	6,47	7,55	9,21	12,33	22,82
50	1,81	2,66	3,46	4,20	5,03	5,97	6,99	8,67	11,74	21,37
60	1,67	2,49	3,24	3,96	4,75	5,66	6,65	8,33	11,36	20,45
70	1,59	2,38	3,10	3,79	4,56	5,44	6,41	8,09	11,10	19,82
80	1,52	2,29	2,99	3,67	4,42	5,29	6,24	7,92	10,91	19,36

6.3. Curva de equilibrio del sistema papel-aceite para BIOELECTRA™

En esta sección se presentan el conjunto de curvas de equilibrio para sistemas papel-aceite para el éster vegetal BIOELECTRA™. A continuación se presentará la tabla con la cantidad de agua absorbida por el aceite a cierta temperatura y humedad relativa. Más tarde se mostrará la curva de equilibrio.

Tabla 6.2: Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para BIOELECTRA™

Temperatura (°C)/ Cantidad de agua contenida en el aceite (ppm)	Humedad relativa (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	56,08	112,16	148,80	224,32	284,80	336,48	386,70	448,64	504,72	560,80
40	68,01	136,02	204,03	272,04	340,05	408,06	476,07	544,08	612,09	680,10
50	88,52	177,04	265,56	354,08	442,60	531,12	619,64	708,16	796,68	885,20
60	118,73	237,46	356,19	474,92	593,65	712,38	831,11	949,84	1068,57	1187,30
70	162,14	324,28	486,42	648,56	810,70	972,84	1134,98	1297,12	1459,26	1621,40
80	182,52	365,04	547,56	730,08	912,60	1095,12	1277,64	1460,16	1642,68	1825,20

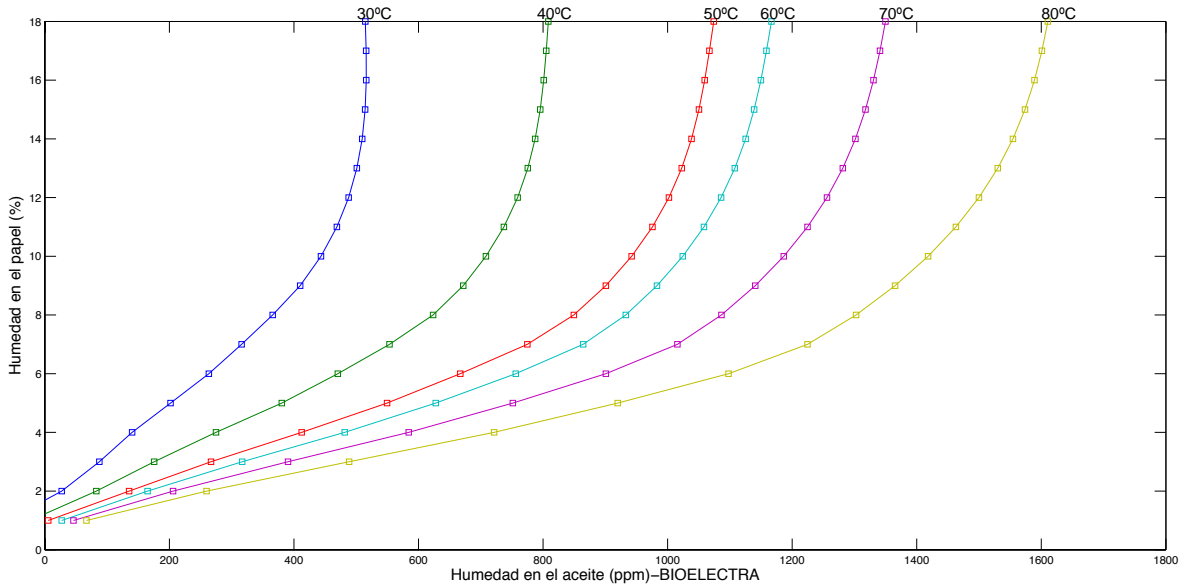


Figura 6.1: Curva de equilibrio en el sistema papel-aceite con aceite BIOELECTRA™

### 6.4. Curva de equilibrio del sistema papel-aceite para BIOTEMP™

Se presenta a continuación la tabla con los valores de cantidad de agua absorbida por el aceite a distintas temperaturas y humedad relativas. Posteriormente, se presentan las curvas de equilibrio del sistema papel-aceite para el aceite BIOTEMP™.

Tabla 6.3: Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para BIOTEMP™

Temperatura (°C)/ Cantidad de agua contenida en el aceite (ppm)	Humedad relativa (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	104,82	220,98	336,50	453,30	574,58	685,62	794,80	917,94	1034,10	1152,80
40	139,74	279,48	419,22	558,96	698,70	838,44	978,18	1117,92	1257,66	1397,40
50	167,37	334,74	502,11	669,48	836,85	1004,22	1171,59	1338,96	1506,33	1673,70
60	200,33	400,66	600,99	801,32	1001,65	1201,98	1402,31	1602,64	1802,97	2003,30
70	236,31	472,62	708,93	945,24	1181,55	1417,86	1654,17	1890,48	2126,79	2363,10
80	266,14	532,28	798,42	1064,56	1330,70	1596,84	1862,98	2129,12	2395,26	2661,40

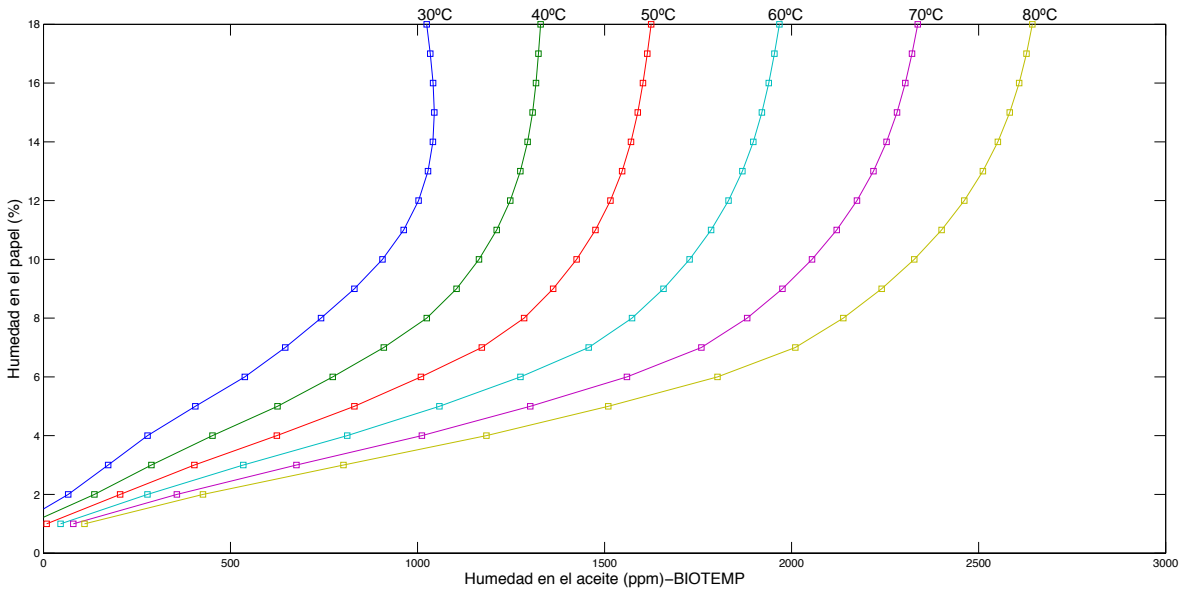


Figura 6.2: Curva de equilibrio en el sistema papel-aceite con aceite BIOTEMP™

6.5. Curva de equilibrio del sistema papel-aceite para Nytro Taurus<sup>TM</sup>

Finalmente, se muestra la tabla resumen de los valores de cantidad de agua contenida en el aceite a cierta temperatura y a cierta humedad relativa. Tras esto, se mostrará el conjunto de curvas de equilibrio del aceite Nytro Taurus<sup>TM</sup>.

Tabla 6.4: Valores de humedad contenida en el aceite a una temperatura y humedad relativa definidas para Nytro Taurus<sup>TM</sup>

Temperatura (°C)/ Cantidad de agua contenida en el aceite (ppm)	Humedad relativa (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	4,87	9,74	16,30	19,48	24,60	29,22	34,40	38,96	43,83	48,70
40	5,61	11,22	16,83	22,44	28,05	33,66	39,27	44,88	50,49	56,10
50	7,60	15,20	22,80	30,40	38,00	45,60	53,20	60,80	68,40	76,00
60	11,71	23,42	35,13	46,84	58,55	70,26	81,97	93,68	105,39	117,10
70	16,80	33,60	50,40	67,20	84,00	100,80	117,60	134,40	151,20	168,00
80	29,79	59,58	89,37	119,16	148,95	178,74	208,53	238,32	268,11	297,90

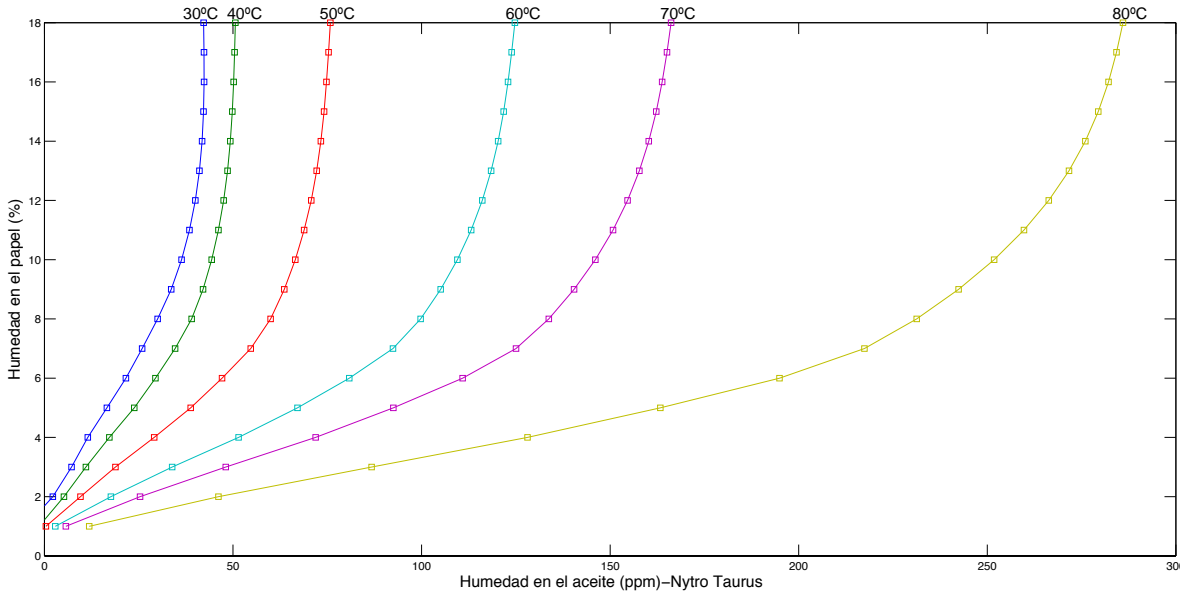


Figura 6.3: Curva de equilibrio en el sistema papel-aceite con aceite Nytro Taurus<sup>TM</sup>



## Capítulo 7

# Conclusiones

En este capítulo se expondrán las conclusiones obtenidas a lo largo del Trabajo Fin de Grado. Además, se resumirán las contribuciones que el texto hace al actual estado del arte y se tratarán las líneas de investigación que deja abiertas para futuras tesis o artículos.

Aunque este texto se haya basado en su mayoría en trabajo experimental de laboratorio, también se espera que sirva de referencia al incluir, tanto en el Capítulo 2 como en el Capítulo 3, revisiones de los conceptos básicos de humedad en el transformador y de las metodologías usadas hasta el momento para el cálculo de los diferentes parámetros de importancia en las curvas de equilibrio de los sistemas papel-aceite de transformador.

El uso de dos métodos experimentales para la determinación de las curvas de solubilidad de los aceites ha verificado que los valores obtenidos experimentalmente son los correctos para los tres aceites. Además, al comparar los datos de las curvas de solubilidad hallados en el TFG con los valores de los fabricantes, las curvas son coincidentes para el aceite vegetal BIOTEMP<sup>TM</sup> y para el aceite mineral Nytro Taurus<sup>TM</sup>, lo que le da veracidad a la metodología experimental. Se aportan entonces dos metodologías igualmente válidas para el cálculo de curvas de solubilidad.

Para el aceite vegetal BIOELECTRA<sup>TM</sup> los resultados experimentales obtenidos por ambos métodos difieren de los valores aportados por el fabricante. Este hecho se puede deber a la extrapolación que hay que hacer de los valores de humedad aportados por el fabricante, ya que éste no aporta una curva de solubilidad como tal. Al haber hallado resultados positivos para los otros dos aceites, se puede concluir que la curva de solubilidad obtenida para

---

BIOELECTRA<sup>TM</sup> en este TFG es acertada.

Tal y como se suponía desde el primer momento, los aceites vegetales han absorbido una cantidad de agua muy superior a los aceites minerales debido a su carácter más polar. Este hecho se ha verificado en la Figura 5.10 donde se pueden observar las curvas de solubilidad experimentales y teóricas de los tres aceites.

Las investigaciones llevadas a cabo han servido para determinar las curvas de equilibrio de sistemas de aislamiento papel-aceite de transformador para tres aceites comerciales distintos a través de las curvas de equilibrio aire-papel de Oommen y las curvas de equilibrio aceite-aire obtenidas mediante dos métodos experimentales distintos. Se obtienen así, las curvas de equilibrio para tres aceites comerciales, siendo las curvas de equilibrio para los aceites vegetales novedad en la literatura.

También se ha de hacer hincapié en las comparaciones llevadas a cabo constantemente en el texto entre aceites minerales y vegetales, aportando así luz a estos últimos que tantas dudas están suponiendo al emerger de manera tan rápida.

Finalmente, este trabajo deja abiertas las puertas a futuras investigaciones sobre aceites vegetales comerciales: curvas de equilibrio a mayor temperatura, variación en el ángulo de pérdidas ( $tg\delta$ ), cambios en la acidez al humectarse el aceite, la descomposición de gases que sufre por el envejecimiento, entre otros.







## Bibliografía

- [1] CIGRÉ WG A2.35 (Octubre 2010). Experiences in Service with New Insulating Liquids, *CIGRÉ*, vol. 436. ISBN: 978-2-85873-124-4.
  - [2] Oommen, T.V., Claiborne, C.C. & Mullen, J.T. (1997). Biodegradable Electrical Insulation Fluids, *Electrical Insulation Conference, and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, 22-25 Septiembre 1997, pp. 465-468.
  - [3] Perrier, C. & Beroual, A. (2008). Experimental Investigations on Mineral and Ester Oils for Power Transformers, *Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on*, 9-12 Junio 2008, pp. 178-181.
  - [4] McShane, P.C., Corkran, J., Rapp, K. & Luksich, J. (2009). Natural Ester Dielectric Fluid Development, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 21-24 Mayo 2006, pp. 18-24.
  - [5] CIGRÉ WG A2.30 (Junio 2008). Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems, *CIGRÉ*, vol. 349. ISBN: 978-2-85873-036-0.
  - [6] CIGRÉ D1.01.10 (Octubre 2007). Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformers, *CIGRÉ*, vol. 323. ISBN: 978-2-85873-018-6.
  - [7] Karsai, K., Kerényi, D. & Kiss, L. (1987). *Large Power Transformers*. ISBN: 9780444995117.
  - [8] Cheim, L., Platts, D., Prevost, T. & Shuzhen Xu (2012). Furan Analysis for Liquid Power Transformers, *IEEE, Electrical Insulation Magazine*, vol.28, no.2, pp.8-21, March-April 2012.
  - [9] CIGRÉ WG A2 12.18 (2003). *Life Management of Transformers*, vol. 227.
-

- [10] Mladenov, E.S., Staykov, S.G. & Cholakov, G.S. (2009). Water Saturation Limit of Transformers Oils, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, *IEEE 25(1)*, pp. 23-30.
- [11] García Gómez, D.F. (2012). *Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid.
- [12] Zhaotao Zhang, Jian Li, Grzybowski, S. & Ping Zou (2011). Moisture Equilibrium in Vegetable Oil and Paper Insulation System, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2011 Annual Report Conference on*, 16-19 Octubre 2011, pp. 428-431.
- [13] REPSOL(2012). *Manual de Utilización del Aceite REPSOL BIOELECTRA*.
- [14] PUCARO (2008). *Biotemp. Biodegradable Dielectric Insulating Fluid for Distribution and Power Transformers. Available Technical Data & Further Test Plan Information*.
- [15] NYNAS (2012). *Nytro Taurus. Electrical Insulating Oil*.
- [16] NYNAS (2008). *Nytro Taurus. Safety Data Sheet*.
- [17] Clark, F.M. (1942). Factors Affecting the Mechanical Deterioration of Cellulose Insulation, *Transactions of Electrical Engineering*, 1949, pp. 742-749.
- [18] Fabre, J. & Pichon, A. (1960). Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers, *International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRÉ)*, París, Francia, 1960, pp. Artículo 137.
- [19] García, B., Burgos, J. C., Alonso, A. M., & Sanz, J. (2005). A Moisture-in-Oil Model for Power Transformer Monitoring-Part I: Theoretical Foundation. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2005, 20(2), pp. 1417-1422.
- [20] ASTM (1987). *ASTMD 1533-86. Standard Test Methods for Water In Insulating Liquids, Karl Fischer Reaction Method*.
- [21] ASTM (1998). *ASTM D 4056-92. Standard Test Methods for Estimation of Solubility of Water in Hydrocarbons and Aliphatic Ester Lubricants*.
- [22] Du, Yanqing (1999). *Moisture and Temperature Effect on the Dielectric Spectrum of Transformer Insulation Materials*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Tecnológico de Massachusetts.

- [23] Degang Gan, Fan Liu, Lin Du & Yuming Liu. (2010). Analysis of Water Solubility in Transformer Oil Using Least Square Fitting Method. *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2010 International Conference on*, pp. 93-95.
- [24] Oommen, T.V. (1983). Moisture Equilibrium in Paper-Oil Insulation Systems, *Proceedings of the 16th Electrical / Electronics Insulation Conference*, 1983, pp. 162-166.
- [25] Du, Y., Mamishev, A.V., Lesieutre, B.C., Zahn, M. & Kang, S.H. (2001). Moisture Equilibrium for Differently Conditioned Transformer Oils, *IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society*, 2001, vol. 8, no. 5, pp. 805-811.
- [26] Piper, J.D. (1946). Moisture Equilibrium Between Gas Space and Fibrous Materials in Enclosed Electric Equipment, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 65(12), 1946, pp. 791-797.
- [27] Fessler, W.A., Rouse, T.O., McNutt, W.J. & Compton, O.R. (1989). A Refined Mathematical Model for Prediction of Bubble Evolution in Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, pp. 391-404.
- [28] Scala, M. (2008). Type Moisture Assesment in Transformers Including Overloading Limits, *CIGRÉ 2008*, Artículo No.A2-202.
- [29] Griffin, P.J., Bruce, C.M. & Christie, J.D. (1988). Comparison of Water Equilibrium in Silicone and Mineral Oil Transformers, *Minutes of the Fifty-Fifth Annual International Conference of Doble Clients*, 1988, Artículo No.10-9.
- [30] AENOR (2013). *UNE-EN 60475. Método de Toma de Muestras de Líquidos Aislantes*.
- [31] AENOR (1999). *UNE-EN 60814. Líquidos Aislantes. Papeles y Cartones Impregnados en Aceite. Determinación del Contenido en Agua por Valoración Coulométrica Automática de Karl Fischer*.
- [32] Jovalekic, M., Kolb, D., Tenbohlen, S., Bates, L. & Szewczyk, R. (2011). A Methodology for Determining Water Saturation Limits and Moisture Equilibrium Diagrams of Alternative Insulation Systems, *2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (2011)*, pp. 1-5, 26-30.